

Magnetometrične raziskave železnodobnega talilnega kompleksa na Cvingerju pri Meniški vasi

Branko MUŠIČ in Lionel ORENGO

Izvleček

Na Cvingerju pri Meniški vasi smo uporabili geofizikalno metodo za ugotavljanje arheološkega potenciala železnodobnega železarskega talilnega kompleksa. Definirali smo tip arheoloških ostalin in območje metalurških aktivnosti natančno zamejili po površini. Za interpretacijo izmerjenih magnetnih anomalij smo uporabili empirični pristop. Upoštevali smo jakost in obliko magnetne anomalije nad blokom talne žilindre talilne peči, katere položaj na terenu je bil znan iz predhodnih arheoloških izkopavanj. Na ta način smo posredno dokazali obstoj objektov s podobnimi magnetnimi lastnostmi znotraj območja, ki ga je že Borut Križ zamejil na podlagi razširjenosti površinskih najdb stranskih produktov metalurgije. Z magnetometričnimi raziskavami smo ugotovili ostanke talilnih peči na nekoliko širšem območju (približno 100 x 50 m), kot je bilo ocenjeno na podlagi terenskih pregledov. Da gre za talilni kompleks s talilnimi pečmi oz. preprostimi plavži, ki so jih uporabljali pri ekstenzivnih metalurških procesih dokazujejo bloki talne žilindre v jamah pod plavži, ki so jih odkrili pri arheoloških izkopavanjih. Nenazadnje dokazujejo to tudi določene posebnosti odpadnih produktov metalurgije, ki smo jih pobrali pri terenskih obhodih. Za obravnavane vzorce smo v članku podali makroskopske opise. Kot posredni dokaz za takšen tip talilniškega kompleksa lahko uporabimo tudi rezultate magnetometrije. Na razmeroma majhni površini smo odkrili veliko število močnih magnetnih anomalij. Tako velika koncentracija talilnih peči je značilna le za metalurške obrate z ekstenzivnimi metalurškimi procesi, kjer so gradili peči za enkratno uporabo. Za interpretacijo magnetometrije in oceno fizikalnih parametrov arheoloških objektov kot so navidezna magnetna susceptibilnost, oblika in velikost ter globina na kateri se nahajajo smo uporabili metodo magnetnega modeliranja tri-dimenzionalnih objektov.

UVOD

Glavni razlog za številne in široko zastavljene raziskave železnodobnih železarskih talilnih pe-

Abstract

Geophysical prospecting methods were carried out at Cvinger near Meniška vas to determine the archaeological potential of the Iron Age iron-smelting centre. The type of archaeological remains and the area of metallurgic activity were defined and delimited upon the surface. An empirical approach was applied for the interpretation of the measured magnetic anomalies. The intensity and the shape of the magnetic anomalies above the slag block from the iron-smelting furnace, whose location was known already from previous archaeological excavations, were considered. We thus indirectly confirmed the existence of objects with similar magnetic characteristics within the area that Borut Križ had already delimited on the basis of the distribution of surface finds of metallurgic waste products. Magnetometric analyses detected the remains of iron-smelting furnaces in a somewhat wider area (approximately 100 x 50 m) than was estimated during field surveillance. Slag blocks in pits under the iron-smelting furnaces that were discovered during archaeological excavations substantiate the existence of an iron-smelting complex with iron-smelting furnaces, or rather simple iron-smelting furnaces that were used for extensive metallurgic processes. Particular metallurgic waste products that were collected during the field walking also justify this assertion. Macroscopic descriptions discussing the samples have been presented in the article. The magnetometry results also provide indirect proof for this type of iron-smelting complex. A large number of strong magnetic anomalies were detected within a relatively small surface. Such a large concentration of iron-smelting furnaces is characteristic only of a metallurgic plant carrying out extensive metallurgic processes where furnaces were built for a single application. Three-dimensional magnetic modelling was applied for the interpretation of the magnetometry and for an estimate of the physical parameters of archaeological objects, such as the apparent magnetic susceptibility, and the form, size and depth at which they are situated.

či, ki so znane po jamah, zapolnjenih z bloki talne žilindre (*sl.* 5), in so jih uporabljali pri ekstenzivnih metalurških procesih za pridobivanje železa ob koncu prvega tisočletja pr. n. š. pa do pr-

ve polovice prvega tisočletja n. š. v centralni, severni in vzhodni Evropi, je njihova velika razširjenost (Smekalova 1993, 83). Zato so se pri arheološki prospekciji, katere cilj je odkrivanje takšnih objektov, že zelo zgodaj, v začetku 60-ih let uveljavile tudi geofizikalne raziskave. V nadaljevanju podajamo pregled nekaterih pomembnejših del s področja geofizikalnih raziskav na železarskih talilnih kompleksih, kjer so ohranjene jame z bloki talne žindre. Celosten pregled arheomagnetnih raziskav na Danskem sta naredila Abrahamsen in Breiner (1993, 5-17). Na železnodobnem železarskem talilnem kompleksu pri Snorupu so izvedli magnetometrične raziskave in podali ustrezne modele za modeliranje magnetnih anomalij blokov talnih žlinder (Smekalova 1993, 83-103). Obsežne geofizikalne raziskave na podobnih najdiščih so naredili tudi na Poljskem (Bielenin 1966, 159-177; Bielenin 1967, 241-251; Bielenin 1974; Bielenin 1983, 79-97; Dąbrowski et al. 1962, 605-615). Z geofizikalnimi raziskavami so npr. v porečju Barycz, Leszno Province odkrili osem talilnih kompleksov na območju, velikem 20 ha (Mamzer 1984, 682,683). Z magnetno prospekcijo v Sudicah na Češkem so odkrili tri železarske talilne komplekse iz 3. in 4. st. n. š., kjer je bilo od 17 do 72 blokov talnih žlinder (talilnih peči) (Hašek, Mayer 1977, 57-65; Hašek et al. 1977, 296-300; Grolich in Souchopová 1977, 12-23; Ludikovský 1978, 79-103; Hašek et al. 1978, 46-60). V Nemčiji so z magnetometrijo raziskali območje z ostalinami metalurških aktivnosti za pridobivanje železa na najdišču Joldelund, Nordfriesland. Na površini 1000 m² so odkrili 21 blokov talnih žlinder (Jöns 1992, 313). Geofizikalne prospekcije na podobnih železarskih kompleksih so opravili še na nekaterih drugih najdiščih v Nemčiji (Wollschläger 1992, 314).

Pri odkrivanju arheoloških industrijskih obratov, ki so povezani z metalurškimi procesi, lahko uporabimo glede na arheološki kontekst ciljnih objektov in fizikalno teorijo, ki upošteva naravo materialov, iz katerih so zgrajeni, njihovo velikost, globino na kateri se nahajajo ter npr. nekatere izkušnje uporabne geofizike iz rudne geologije (glej npr. Telford et al. 1990 in Dobrin et al. 1988), načeloma le tri različne geofizikalne metode.

Pri odkrivanju metalurških objektov, deponij jalovine ali rude se je ponekod dobro obnesla geoelektrična metoda *lastnih potencialov* ali sponatane polarizacije (SP), ker lahko s to metodo učinkovito lociramo večjo maso kovin, kot sta npr. železo in bron (Bevan 1996a, 45). Najpogostejšo omejitev predstavljajo visoki šumi ozadja, ki lah-

ko zasenčijo naravne električne tokove, ki nastajajo v vlažnem okolju zaradi prisotnosti kovinskih mineralov v odpadnih produktih metalurgije. Zaradi tega težko natančno določimo položaj in velikost ciljnih objektov. Praktična pomanjkljivost te metode za arheologijo je tudi čas, potreben za izvedbo terenskih meritev (približno 1 minuta za vsako merilno točko) (Wynn et al. 1984, 195-204).

Za ugotavljanje območij dobre električne prevodnosti se tudi v arheologiji pogosto uporablja metoda *elektromagnetne indukcije* (EM). Običajni detektorji kovin so npr. le ena od posebnih izvedb instrumentov, ki temeljijo na tem fizikalnem principu (Bevan 1996b, 29). Najpomembnejša prednost izvedb instrumentov, ki jih uporabljamo v arheologiji, je ta, da lahko z njimi poleg konduktivnosti merimo hkrati tudi kontrast v magnetni susceptibilnosti med arheološkimi objekti in zemljiščem, v katerem so (Tite et al. 1970, 97), kar je še posebej pomembno za odkrivanje arheoloških industrijskih obratov. Dabas in sodelavci (1993, 64-66) so na primer dobili dobre rezultate z elektromagnetno metodo (SH₃), s katero so simultano merili električno konduktivnost in magnetno susceptibilnost na železarsko talilniškem kompleksu iz zgodnjega antičnega obdobja na arheološkem najdišču Milanówek - Felecin na Poljskem.

Glede na dejstvo, da so bile tudi pri arheoloških izkopavanjih na Cvingerju pri Meniški vasi odkrite jame z bloki talne žindre (Križ 1993, 86), smo se odločili za magnetometrično metodo, ki se je izkazala za najprimernejšo na vseh podobnih arheoloških najdiščih. Smekalova in sodelavci (1993, 84) pišejo, da ostanke železarsko talilnih kompleksov tega tipa predstavlja debela akumulacija blokov talne žindre, ki so ostali na prvotnem mestu po procesu taljenja. Takšni talilni kompleksi predstavljajo bolj ali manj kompaktne skupine močno magnetnih objektov, ki ležijo plitvo pod površjem. Zaradi tega je magnetna prospekcija izjemno učinkovita metoda za odkrivanje in kartiranje takšnih metalurških kompleksov

Z *magnetometrično metodo* ugotavljamo jakost ali amplitudo Zemljinega magnetnega polja. Objekti, ki vsebujejo železove minerale, so dobri "prevodniki" tega magnetnega polja in magnetno polje se v takšnih objektih koncentrira; nasprotno se zaradi tega pojava jakost magnetnega polja v neposredni bližini objektov zniža. Z magnetometrijo torej ugotavljamo deformacije Zemljinega magnetnega polja zaradi prisotnosti objektov, ki vsebujejo železo (železove minerale). Rezultirajoče magnetne anomalije so torej posledica razlik v magnetni susceptibilnosti materialov. Magnetna susceptibilnost in remanentna magnetizacija zem-

ljišča sta neposredno pomembni za arheološko interpretacijo, ker je jakost magnetne susceptibilnosti v različnih geoloških kontekstih posledica človekovih aktivnosti v arheološki preteklosti (Desvignes 1995, 129).

Zaradi prisotnosti železa v glini, ki ga je običajno le nekaj odstotkov, pride pri segrevanju in ohlajanju do tvorbe ferimagnetnih mineralov (železovi oksidi). Zaradi tega je magnetna susceptibilnost žgane glinice višja od zemljišča v katerem je. Pri ohlajanju pod kritično temperaturo za železove okside (blizu 580°C za magnetit, in 680°C za hematit) inducirana magnetizacija v glini "zamrzne" kot stabilna naravna remanentna magnetizacija (NRM). Rezultat je anomalna smer in jakost lokalnega magnetnega polja v bližini žgane glinice (Abrahamsen et al. 1991, 659). Arheološke objekte, zgrajene iz žgane glinice, kot so npr. razne peči, lahko zato lociramo na podlagi remanentnega magnetizma, ki ga imajo ti objekti. Ta tip remanentnega magnetizma imenujemo termoremanentni magnetizem (TRM), ker se na ta način namagnetijo minerali, ki so bili izpostavljeni visokim temperaturam pri žganju. Močen remanentni magnetizem rezultira iz progresivne konverzije nizko magnetnih železovih hidroksidov pri segrevanju v visoko magnetne oblike železovih mineralov, kot sta magnetit in maghemit. Pri ohlajanju material ohrani termoremanentni magnetizem, ki ima smer takratnega Zemljinega magnetnega polja, in se za razliko od inducirane magnetizacije praviloma razlikuje od smeri današnjega Zemljinega magnetnega polja. Jakost magnetnih anomalij, ki nastanejo na ta način, je lahko 10 do 100 krat večja kot pri tistih, ki so nastale zaradi inducirane magnetizacije. Industrijska področja z ostanki žgalnih in talilnih peči običajno dajo nasploh nejmočnejše magnetne anomalije na arheoloških najdiščih. Takšne anomalije so običajno tudi jasno bipolarne, kar nam pri ugodnih naravnih danostih omogoča natančno opredelitev tipa arheoloških ostalin (npr. železarskih talilnih peči) in v nekaterih primerih tudi oceno njihove velikosti, oblike in globine.

Pri magnetni prospekciji ugotavljamo lokalne razlike v magnetni susceptibilnosti v prisotnosti primarnega Zemljinega magnetnega polja. To zunanje polje je uniformno in so zaradi tega magnetne anomalije vektorska vsota posameznih manjših dipolnih magnetnih polj. Magnetni momenti v arheološkem objektu (ali delih objekta), ki je na prvotnem mestu in je inducirano/termoremanentno namagneteno, so enako usmerjeni. Zaradi tega lahko talilne peči obravnavamo kot magnetne dipole, ki so usmerjeni približno v smeri, ki jo je

imelo Zemljino magnetno polje v času, ko so se peči ohladile in je takratno magnetno polje v njih "zamrznilo". Za določitev oblike in globine takšnih objektov lahko uporabimo *metodo tridimenzionalnega magnetnega modeliranja*.

Magnetno modeliranje je uveljavljena metoda za preverjanje interpretacije magnetogramov in koralecijo magnetnih in arheoloških podatkov. Pri magnetnem modeliranju simuliramo terenske magnetne meritve na modelih. Tako izračunane, sintetične magnetograme primerjamo s terenskimi meritvami in model interaktivno popravljamo tako dolgo, da se zadovoljivo ujemata. Za magnetne metode je modeliranje tridimenzionalnih objektov preprosto in se uporablja pri arheološki prospekciji več kot 20 let (glej npr. Linington 1964, 3-13; Linington 1972, 9-59; Godson 1983, 62). Pri modeliranju magnetnega polja arheoloških objektov obravnavamo tla in arheološke objekte kot distribucijo magnetnih dipolov: vsak dipol povzroči polje na okolnem območju. Tako je rezultirajoče polje v vsaki točki kombinacija polj vseh dipolov (Allun 1995, 197). Modeliranje temelji na enačbah tridimenzionalnih integralov gostote magnetnega polja v točkah na določenih razdaljah od magnetnih dipolov. Za tridimenzionalno magnetno modeliranje arheoloških objektov pa lahko uporabimo tudi računalniške programe, ki računajo magnetne anomalije na podlagi eksaktnih enačb Zemljinega magnetnega polja (glej npr. Plouff 1975).

PREGLED DOSEDANJIH ARHEOLOŠKIH RAZISKAV

Sistematična arheološka izkopavanja prazgodovinskega gradišča Cvinger potekajo od leta 1986 (Križ 1993, 83). V vseh letih izkopavanj so med drugim našli tudi veliko železove žlindre (Križ 1988, 89). Kot poseben sklop ob naselju in gomilah je opisano tudi 80 x 20 m veliko območje v gozdu, na južnem pobočju hriba med prazgodovinskim naseljem in gomilami. Tam je v prazgodovini obstajal železarsko-talilni kompleks z veliko železove žlindre, ki leži raztresena po gozdnih tleh, ter ostanki železarskih talilnih peči, ki se skrivajo plitvo pod gozdnimi tlemi (Križ 1990, 23). Na tem mestu so izkopali sondo velikosti 4,5 x 4 metre in naleteli na dvanajst peči za taljenje železa, vkopanih v rdečo sterilno ilovico. Peči imajo v tlorisu okroglo ali pravokotno obliko in merijo od 40 do 70 cm, le izjemoma je peč štiri merila 100 x 85 centimetrov. Ostenja peči so bila narejena iz glinice. Ohranili so se le spodnji deli, kjer je glina rdeča,

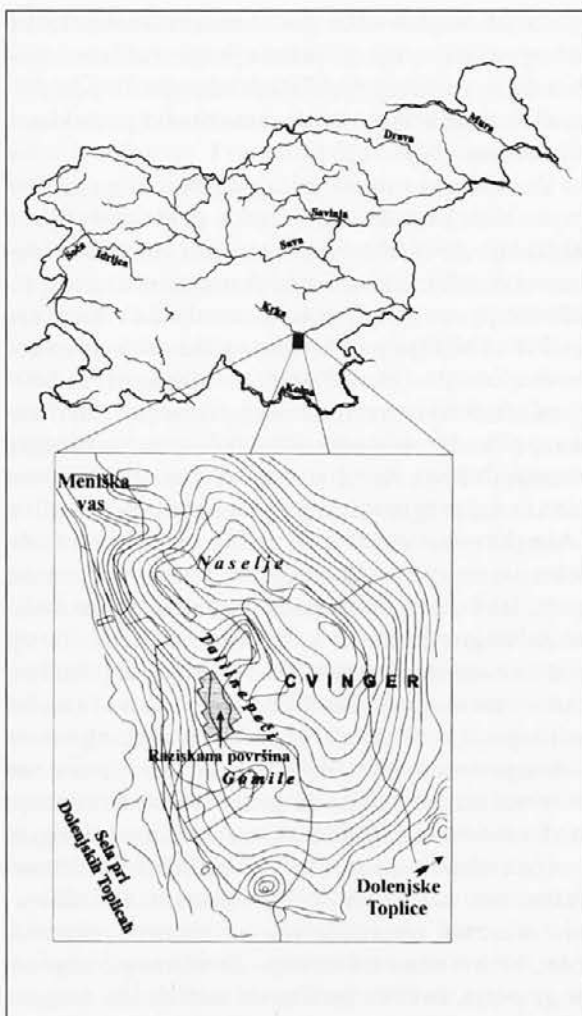
oranžno, sivozeleno ali celo vijoličasto pečena. V notranjosti peči so ostanki železove žlindre, kosi lesnega oglja, včasih pa še popolnoma prežgano kamenje. Ležijo zelo blizu druga drugi, včasih se celo prekrivajo. Kaže, da so bile peči le za enkratno uporabo, nato pa so bile zgrajene nove v neposredni bližini (Križ 1993, 86).

Naselbinske najdbe dokazujejo, da se je življenje na gradišču začelo na začetku starejše železne dobe in je trajalo vse do latenskega obdobja. Obsežno gomilno grobišče, ki leži na južnih pobočjih Cvingerja, je delno raziskal Pečnik v devetdesetih letih 19. stoletja. Gradivo s te nekropole je obdelala Teržanova in ugotovila, da sodi v certoški in negovski horizont (Križ 1988, 89). Križ nadalje piše, da lega naselja na stičišču dolinskih poti iz Bele krajine in po dolini Krke, ter številni sledovi intenzivnega železarstva govore za poselitev, ki je morala biti daljša od časa, ki ga potrjujejo grobne najdbe.

GEOLOŠKA ZGRADBA OBRAVNAVANEGA OBMOČJA

Cvinger je 263 m visok hrib, ki se dviga neposredno nad poplavno ravnico Krke in njenih pritokov Radešče in Sušice (sl. 1). Vznosje hriba gradi spodnjeljurski (spodnji in srednji lias) svetlo siv, nekoliko ooliten apnenec, v katerega zgornjem delu dobimo školjke litotide. Na vrhu hriba najdemo svetlo siv, gost, plastovit apnenec in oolitni apnenec, ki je zgornjeliasne in doggerske starosti (Pleničar et al. 1977, 21,22). Apnenec je močno zakrassel in prekrit z rdečerjavo ilovico (jerino), ki vsebuje veliko železovih mineralov.

V tolmaču Osnovne geološke karte, list Novo mesto (Pleničar, Premru 1977, 40), avtorji navajajo, da se pojavlja limonitna železova ruda v obliki manjših kosov kot konkrecije med pliokvartarno jerino. Na Gorjancih zapolnjuje jerina večje vrtače v zgornjekrednem in jurskem apnencu. V jerini so kosi limonita velikosti največ 20 cm. Najbliže Cvingerju najdemo večje koncentracije kosov limonita v pliokvartarni jerini med Jordankalom in Golobinjekom, ki leži na jurskem apnencu in je približno 11 km severno od Cvingerja. Pri Jordankalu vsebujejo kosi do 36 % železa. Buser (1974, 45) navaja v tolmaču k Osnovni geološki karti, list Ribnica, da so nekoč pridobivali železovo rudo na tem ozemlju iz rdeče glin, v kateri se pojavlja v obliki večjih in manjših konkrecij oziroma geod. Železova ruda, ki so jo nekoč pridobivali iz rdečih glin širom po Dolenjskem, je nastala v sami glini v obliki geod oziroma okroglastih



Sl. 1: Položajna skica železnodobnega arheološkega najdišča na Cvingerju pri Meniški vasi. Vrisana je površina železarskega talilnega kompleksa, ki smo ga zajeli z geofizikalnimi raziskavami.

Fig. 1: An illustration of the main features of the Iron Age archaeological site at Cvinger near Meniška vas. The surface of the iron-smelting centre which was delimited using geophysical investigations is also delineated.

konkrecij. Te konkrecije so običajno v sredini votle, sama lupina pa predstavlja zelo trdno skorjo iz limonita (sl. 20). Ostala potencialna nahajališča železove rude so predstavljali rdeči in rjavi karnijski ter jurski boksiti. Te limonitne konkrecije se dobe danes v glini na zelo redkih mestih.

Drovenik (1984, 244) piše, da so v Sloveniji nabirali bobovec in ga talili v železo že v prazgodovinski dobi. Najpomembnejši rudni mineral tovrstnih rud je železov hidroksid goethit. Večje ali manjše akumulacije te železove rude so bile v nešteti kotanjah in vrtačah - nekdanjih majhnih jezercih, kjer so vladali ustrezni pogoji za nastanek limonitnih konkrecij.

NAČRTOVANJE RAZISKAVE IN UPORABLJENE METODE

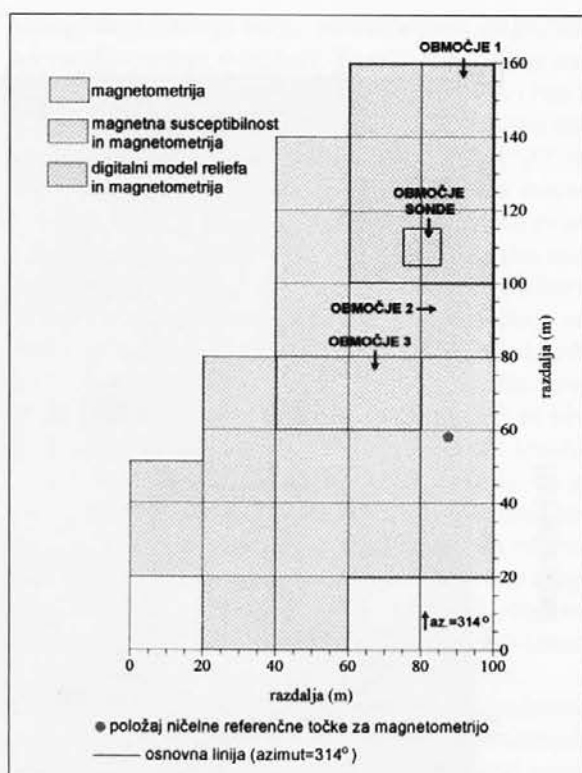
Pri načrtovanju geofizikalnih raziskav na železnodobnem talilnem kompleksu na Cvingerju pri Meniški vasi smo na prvem mestu upoštevali vse arheološke informacije zbrane iz dosedanjih arheoloških raziskav. Poleg tega smo upoštevali še nekatera fizikalna dejstva, ki smo jih opisali v uvodu, posebne naravne danosti, kot tudi rezultate geofizikalnih raziskav na podobnih arheoloških najdiščih drugod po Evropi.

Strategijo magnetometrije narekuje tako velikost raziskovane površine, kot tudi velikost ciljnih objektov. Kvaliteta rezultatov oz. ločljivost predstavlja običajno kompromis med porabljenim terenskim časom in gostoto meritev. Če želimo z magnetometrijo doseči dobro ločljivost, moramo na prvem mestu upoštevati velikost ciljnih objektov, ki narekuje tako razdaljo med merilnimi točkami, kakor tudi oddaljenost sensorja magnetometra od površine.

Od naravnih danosti so za magnetno prospekcijsko najpomembnejše razlike v magnetni susceptibilnosti med naravnimi in arheološkimi materiali na arheološkem najdišču. Meritve navidezne magnetne susceptibilnosti smo uporabili za interpretacijo magnetometrije in deloma tudi kot neodvisno prospekcijsko metodo. Za podporo magnetometriji smo merili susceptibilnost naravnega in kontaminiranega zemljišča ter susceptibilnost vzorcev žindre in geološke podlage (sl. 6). Za prospekcijsko smo izvajali meritve v pravilni mreži neposredno na površini tal (sl. 2: območje 2 in 3).

Pri interpretaciji magnetometrije na morfološko razgibanem terenu moramo vselej upoštevati tudi vpliv t. i. "topografskega efekta". Zaradi velikega kontrasta v magnetni susceptibilnosti med tlemi in geološko podlago, ki je v našem primeru posledica majhne debeline močno magnetnih ilovnatih tal nad zelo šibko magnetnim, zakraselim jurskim apnencem, lahko pride do razmeroma močnih magnetnih anomalij, ki "zastrejo" magnetne anomalije, ki so posledica arheoloških objektov. Da smo lahko ocenili dejanski učinek "topografskega efekta", smo izdelali digitalni model reliefa za severni del raziskanega območja (sl. 2: območje 1).

Rezultate magnetometrije smo interpretirali na podlagi amplitude in frekvence lokalnih anomalij vertikalnega gradienta gostote magnetnega polja. Za interpretacijo ugotovljenih značilnih magnetnih anomalij smo uporabili empirični pristop. Upoštevali smo intenziteto in obliko magnetne anomalije nad blokom talne žindre talilne peči št. 4,



Sl. 2: Cvinger pri Meniški vasi. Shematski prikaz raziskanega območja in delež uporabljenih prospekcijskih metod.

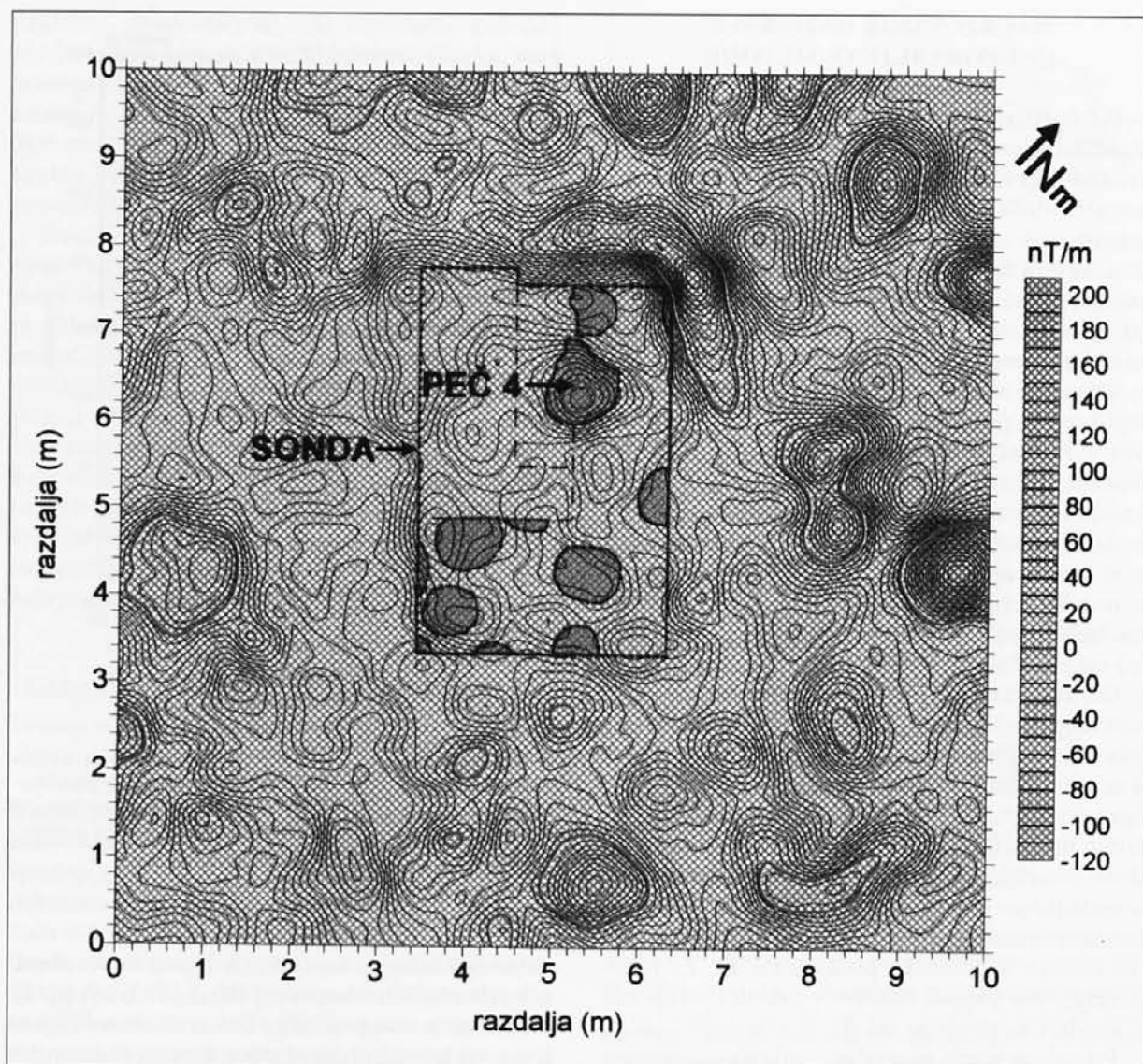
Fig. 2: Cvinger near Meniška vas. A schematic illustration of the investigated area and the ratios of the applied prospecting methods.

katere položaj na terenu je bil znan iz predhodnih arheoloških izkopavanj (Križ 1993, 86) (sl. 3). Na ta način smo posredno dokazali obstoj objektov s podobnimi magnetnimi lastnostmi znotraj območja, ki ga je že Križ zamejil na podlagi razširjenosti površinskih najdb odpadnih produktov metalurgije (sl. 2: območje sonde).

Za natančnejšo opredelitev tipa talilnih procesov smo pregledali vzorce žindre, pobranih na površini pri terenskih obhodih, in za nekatere od teh podajamo tudi makroskopske opise. Namen tega je bil zbrati dodatne dokaze za to, da gre dejansko za železarski talilni kompleks z ekstenzivnimi metalurškimi procesi oz. talilnimi pečmi za enkratno uporabo.

Magnetometrija

Magnetometrijo smo izvajali s pretočnim gradiometrom - PG (*Fluxgate gradiometer*, Geoscan FM36, Geoscan Research, Bradford); (glej npr. Clark 1990, 69-71). S tem instrumentom merimo gradient vertikalne komponente lokalnega mag-



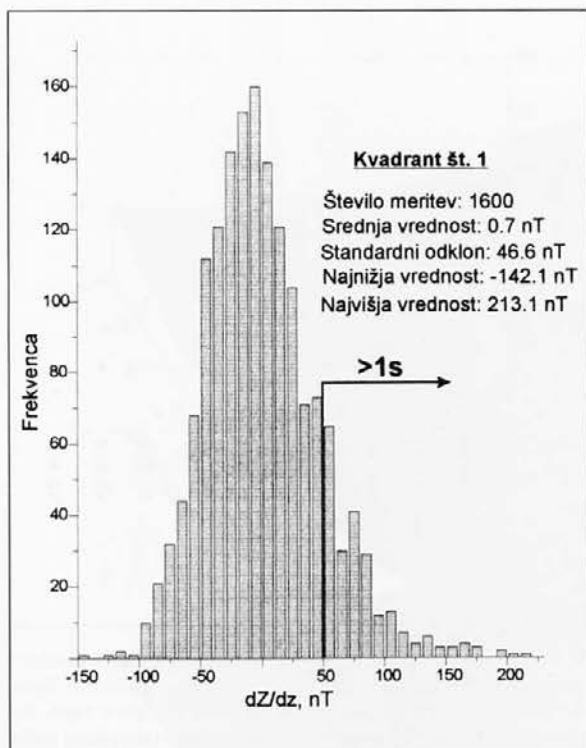
Sl. 3: Cvinger pri Meniški vasi. Karta magnetnih anomalij na območju arheološkega izkopnega polja (Križ 1993, 86 in 90). Lepo so vidne linijske anomalije visokih gradientov na robovih izkopnega polja in visoka anomalija krožnega preseka na mestu peči št. 4. Podobne magnetne anomalije, ki so prav tako posledica inducirano/termoremanentne magnetizacije blokov talne žilindre so tudi povsod okoli sonde. Z rdečo je povdarsena izolinija 50 nT/m (=1s), ki predstavlja spodnjo mejo magnetnih anomalij, ki so posledica močne magnetizacije blokov talne žilindre.

Fig. 3: Cvinger near Meniška vas. A map of the magnetic anomalies in the area of the archaeological excavations (Križ 1993, 86 and 90). The linear anomalies of high gradients along the edges of the excavated area and the intense anomalies of the spherical cross-section where furnace no. 4 was situated are also clearly visible. Similar magnetic anomalies, which are also the result of the induced/thermoremanent magnetisation of the slag blocks, are also present throughout the area. The 50 nT/m (=1s) contour line is emphasised in red, representing the lower limit of magnetic anomalies that are the result of the intense magnetisation of the slag blocks.

netnega polja (dZ/dz , nT/m) glede na ničelno referenčno točko, ki jo določimo na začetku meritev. Ta točka mora biti na magnetno zelo "tihem" prostoru zunaj območja z arheološkimi ostalinami (sl. 2), hkrati pa dovolj blizu iz povsem praktičnih razlogov, ker to točko vseskozi uporabljamo za kalibracijo instrumenta. Rezultati raziskave so v veliki meri odvisni od pravilne izbire te toč-

ke, ker se vse meritve lokalnih gradientov nanašajo na to ničelno točko in pomenijo relativne razlike napram tej točki (sl. 2: referenčna točka).

Teoretično lahko s tem instrumentom zaznamo magnetne anomalije nad arheološkimi materiali, kot so npr. feromagnetni železni objekti in ferimagnetni keramični objekti (npr. lončarske delavnice, talilne peči, opeka, žganinske plasti itd.)



Sl. 4: Cvinger pri Meniški vasi. Histogram izmerjenih vrednosti na območju arheološkega izkopnega polja. Vrednosti višje od enega standardnega odklona ($\approx 50 \text{ nT/m}$), pri razdalji 0,25 m med merilnimi točkami in višino 0,1 m sensorja nad površino, predstavljajo magnetne anomalije, ki so posledica blokov talne žilindre.

Fig. 4: Cvinger near Meniška vas. A histogram of the measured values in the area of the archaeological excavations. Values higher than one standard deviation ($\approx 50 \text{ nT/m}$), at a distance of 0,25 m between the measuring points and measuring more than 0,1 m between the sensor and the ground surface, represent magnetic anomalies that are the result of slag blocks.

(Heathcote et al. 1981, 61-70; Papamarinopoulos et al. 1985, 483-490; Papamarinopoulos et al. 1986, 111,112). Običajno uporabljamo dva sensorja v navpični legi s stalno medsebojno razdaljo (0,5 m) in merimo prirastek (gradient) gostote magnetnega polja na tej razdalji. Gradiometrični način se uporablja za filtriranje anomalij z izvorom na različnih globinah. Ker jakost magnetnih anomalij pada obratnosorazmerno s kubom razdalje od izvora magnetne anomalije, gradiometrična tehnika "ojača" šibke anomalije plitvo ležečih izvorov v primerjavi z močnejšimi, vendar globlje ležečimi izvori magnetnih anomalij (Bozzo et al. 1991, 699).

Ker sta intenziteta in oblika magnetnih anomalij pri arheološki prospekciji odvisni tako od razlike v magnetni susceptibilnosti zemljišča in arheoloških objektov, kakor tudi od smeri Zem-

ljinega magnetnega polja, obravnavamo magnetne anomalije vedno v tej luči. Zaradi tega se vse oznake za sever nanašajo na magnetni sever (Nm). Azimut osnovne linije je 314° (sl. 2). Magnetna deklinacija v Ljubljani je bila leta 1954 $-1^\circ 37'$ in se je od leta 1850 spremenila le za nekaj minut (Miklič 1954, 225). Za naše potrebe lahko privzamemo, da je magnetna deklinacija enaka nič. Magnetna inklinacija pa znaša približno 62° (Telford et al. 1990, 69). Zaradi magnetne inklinacije so magnetne anomalije na tej geografski širini vedno izrazito bipolarne z močnimi pozitivnimi gradienti na južni strani arheološkega objekta in šibkejšimi negativnimi gradienti na severni strani. Smekalova in sodelavci (1993, 87) pišejo, da je razmerje med remanentno in inducirano magnetizacijo (Q) manjše od 1, kar pomeni, da vsebujejo bloki talne žilindre v glavnem inducirano magnetizacijo. To pomeni, da so pozitivni in negativni magnetni gradienti usmerjeni natančno v smeri današnjega Zemljinega magnetnega polja.

Raziskovano območje smo razdelili na kvadrante velikosti $20 \times 20 \text{ m}$ (sl. 2). Meritve smo izvajali pravokotno na osnovno linijo v smeri proti jugozahodu. Azimut magnetnih profilov je bil ves čas enak in je znašal 224° . Razdalja med magnetnimi profili in merilnimi točkami na profilih je bila 0,5 m. Na ta način smo dobili za vsak kvadrant velikosti $20 \times 20 \text{ m}$ 1600 odčitkov. Vseh meritev je bilo 42.400. Gostoto meritev smo določili glede na velikost jam, zapolnjenih z bloki talne žilindre, ki so bile odkrite pri arheoloških izkopavanjih in merijo povprečno 40-70 cm (Križ 1993, 86), le izjemoma so večje. Zaradi zanesljivejše ocene rezultatov magnetometrije in magnetnega modeliranja smo meritve ponovili na območju arheološke sonde (sl. 3). Razdalja med merilnimi točkami je bila v tem primeru v obeh smereh 0,25 m. Pri načrtovanju raziskav smo upoštevali navodila Smekalove in sodelavcev (1993, 83), ki so na podlagi številnih eksperimentov, kjer so uporabljali različno število meritev na enoto površine in različne višine sensorja magnetometra nad površino in ugotovili, da je celo pri zelo magnetnih ostankih železnodobnih talilnih peči mogoče dobiti optimalno informacijo, potrebno za natančno magnetno modeliranje, le v primeru, ko je razdalja med merilnimi točkami v obeh smereh 0,5 m ali manj in kadar je sensor magnetometra zelo blizu površini. V centru skupine, kjer so jamice blizu skupaj, se anomalije sosednjih dipolov namreč seštevajo v odvisnosti od njihove normalizirane razdalje - a/h (h-globina). S protonskim magnetometrom je mogoče razločiti dva sosednja objekta, če je razdalja med jamicami več kot

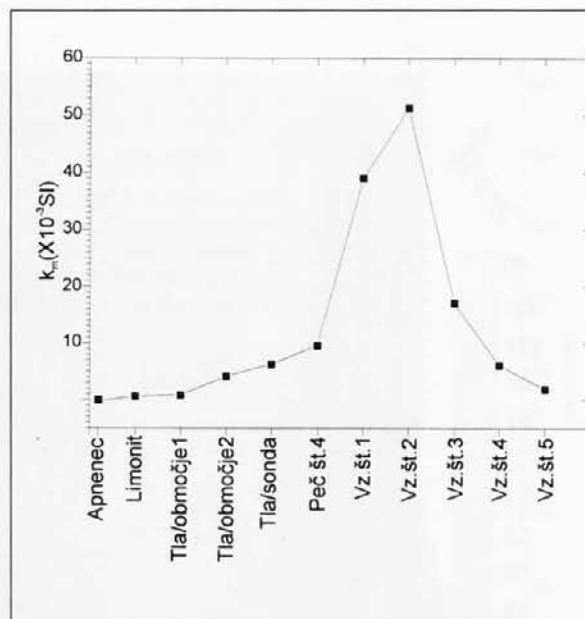


Sl. 5: Rekonstrukcija železarske talilne peči z blokom talne žindre v jami pod pečjo (prirejeno po Smekalova 1993, 84). Takšne peči so uporabljali pri ekstenzivnih metalurških procesih, kjer je bila vsaka peč uporabljena samo enkrat.

Fig. 5: A reconstruction of the ironworks iron-smelting furnace with a slag block in a pit under the furnace (prepared by Smekalova 1993, 84). These types of furnaces were used for extensive metallurgic processes, where the furnaces were built for a single application.

1,5 h. Da dobimo karakteristične anomalije sosednjih blokov žindre pri optimalnih pogojih ločljivosti ($a = 1,5$ h), razdalja med merilnimi točkami ne sme biti večja kot 0,5 m (Smekalova et al. 1993, 89).

Glede na to, da so peči zelo blizu skupaj, ponekod pa se celo prekrivajo, za večjo ločljivost posameznih blokov talnih žindrov z magnetometrijo predlagajo gradientni način meritev. Znano je, da lahko na podlagi anomalij vertikalnega gradienta ločujemo posamezne komponente kompleksnih signalov. Zaradi tega jih uporabljamo za določanje lokacije, oblike in globine teles, ki povzročajo magnetne anomalije. Dodatna prednost gradientnega načina meritev je avtomatično anuliranje regionalnih in občasnih variacij v magnetnem polju (Smekalova et al. 1993, 99).



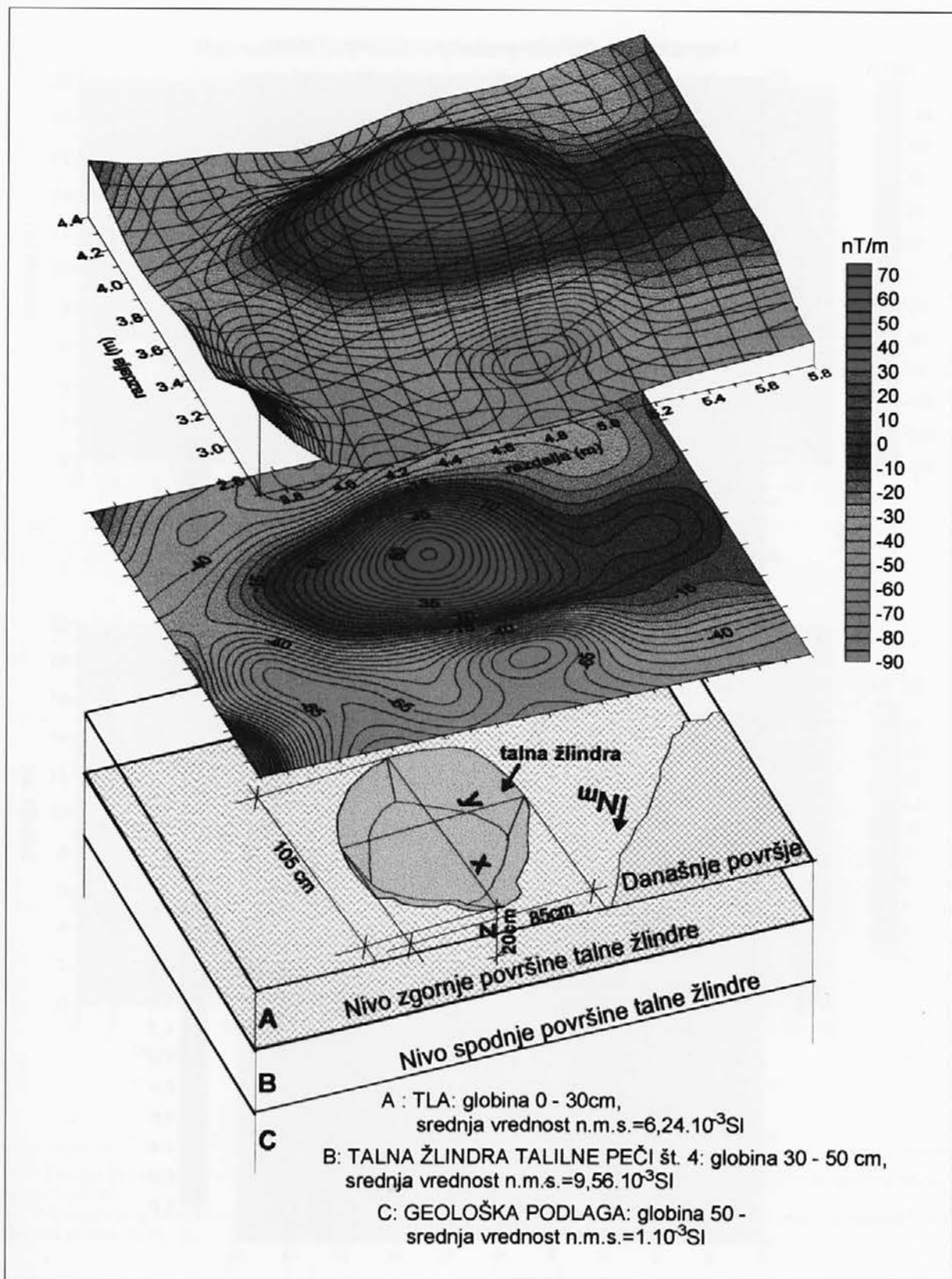
Sl. 6: Cvinger pri Meniški vasi. Primerjava srednjih vrednosti navidezne magnetne susceptibilnosti (k_m) različnih tipov žindre, limonitne konkrecije oz. bobove železove rude, talilne peči št. 4 in tal na območju 1 in 2 ter na izkopnem polju (sl. 2).

Fig. 6: Cvinger near Meniška vas. A comparison between the mean values of the apparent magnetic susceptibility (k_m) of different types of slag, limonite concretions and bog iron ores, the iron-smelting furnace no. 4 and the ground in areas 1 and 2 as well as in the excavated area (Fig. 2).

Magnetna susceptibilnost

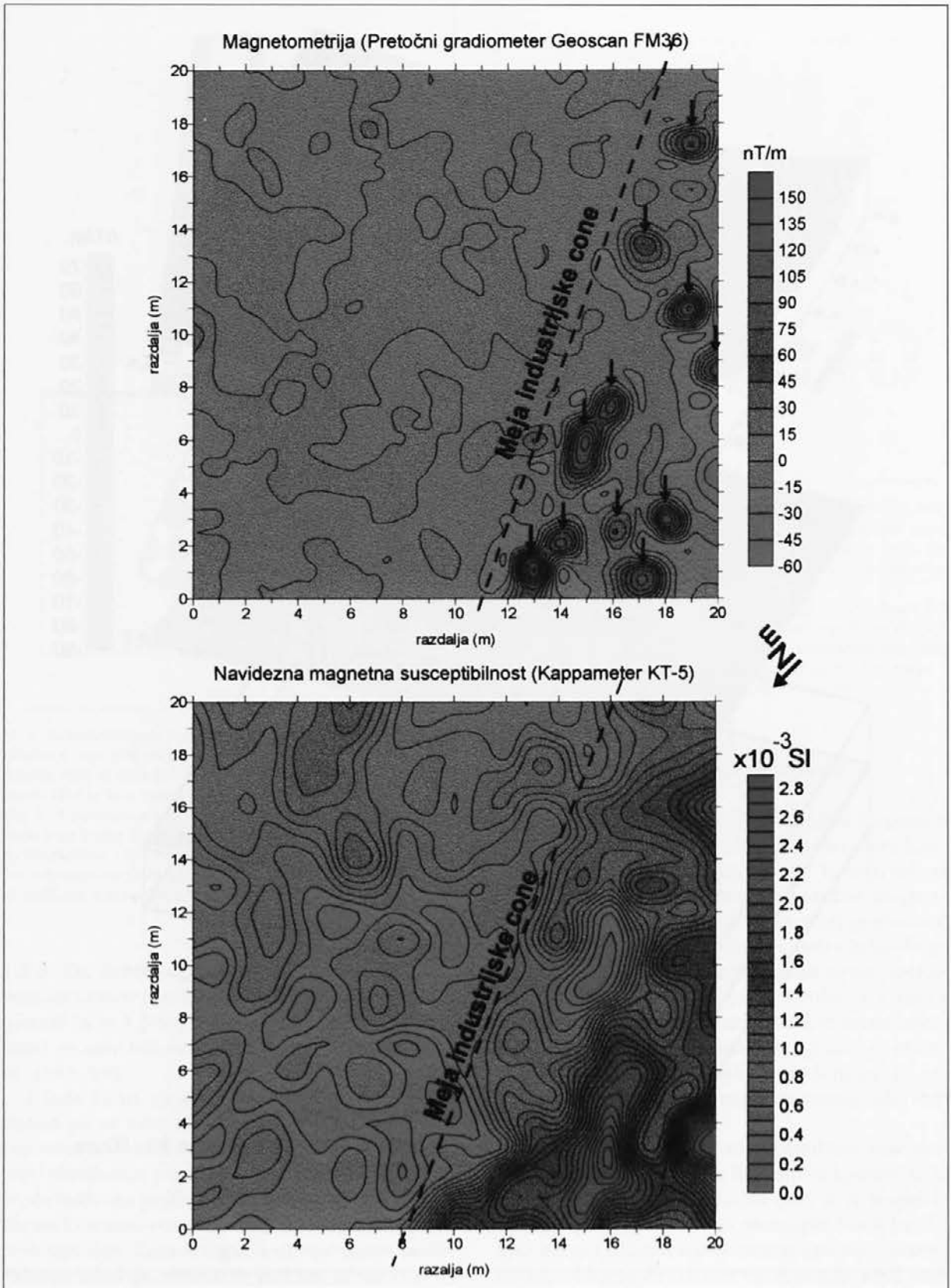
Na Cvingerju smo merili navidezno magnetno susceptibilnost (k) s terenskim instrumentom Kappameter KT-5 (Geofizika, Brno). Ta instrument je sicer namenjen meritvam navidezne magnetne susceptibilnosti vzorcev kamnin pri geološkem kartiranju, vendar se uporablja tudi v arheologiji. Uporaba je v glavnem omejena na ugotovljanje navidezne magnetne susceptibilnosti vzorcev tal, geološke osnove in arheoloških materialov, ki jih najdemo na površini (npr. gradbeni material in žindra). Te podatke potrebujemo za zanesljivejšo interpretacijo magnetometrije (glej npr. Bozzo et al. 1991, 699).

Navidezno magnetno susceptibilnost smo merili na vzorcih žindre, na limonitnih konkrecijah, na bloku talne žindre talilne peči št. 4, na površini izkopnega polja in na območjih 2 in 3 (sl. 2), kjer smo vrednosti navidezne magnetne susceptibilnosti kartirali (sl. 8 in 9). Razdalja med profili in merilnimi točkami je bila 1 m. Na ta način smo dobili za vsak kvadrant velikosti 20 x 20 m 400 odčitkov, vseh meritev pa je bilo 1200. Merili smo direktno na površini, pri čemer smo na



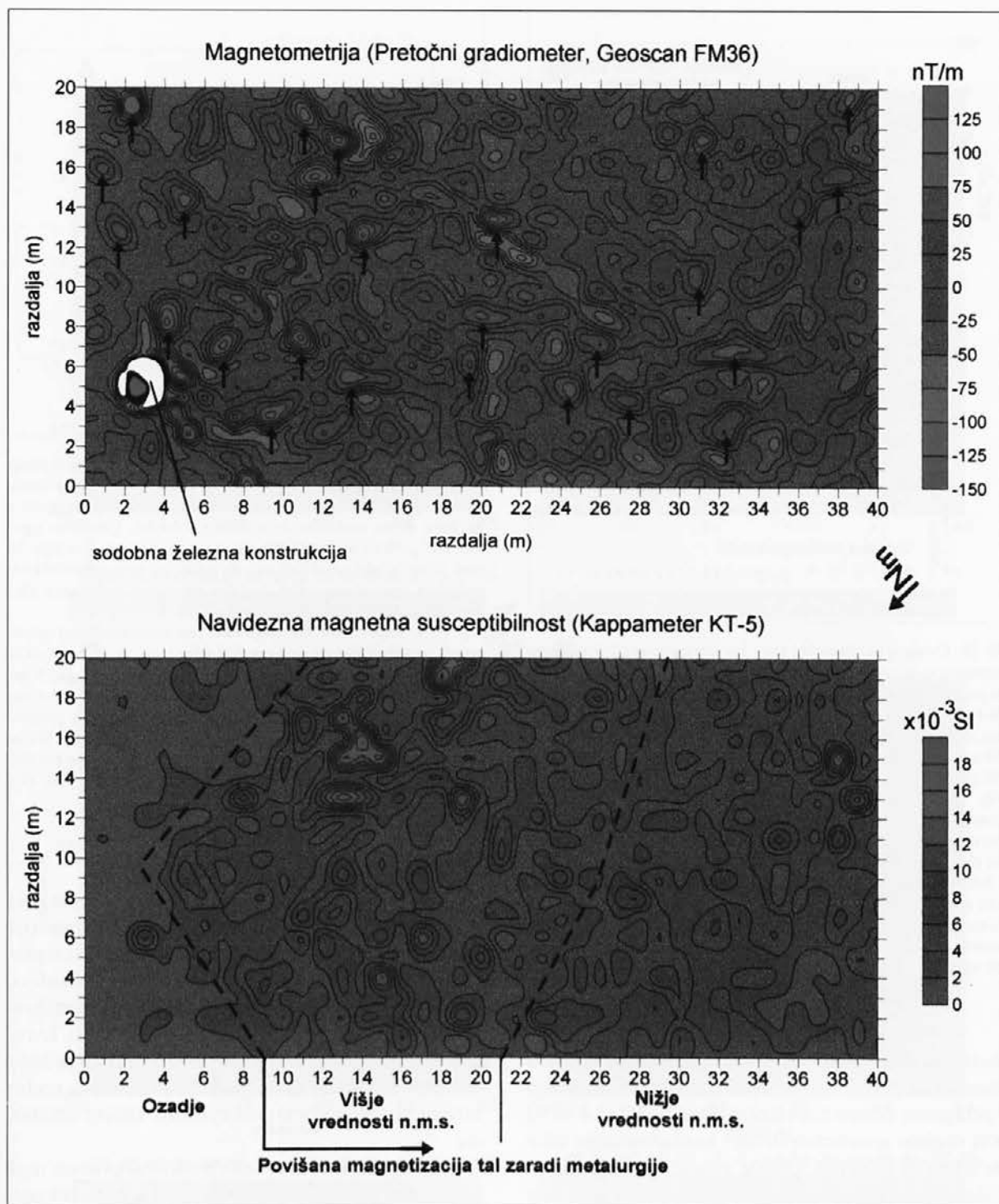
Sl. 7: Cvinger pri Meniški vasi. Anomalija vertikalnega gradienta gostote magnetnega polja (dZ/dz) nad talno žilindo talilne peči št. 4. Oblika magnetne anomalije ne ustreza popolnoma obliki peči, kar je najverjetneje posledica nehomogene sestave.

Fig. 7: Cvinger near Meniška vas. An anomaly of the gradient of the vertical component of the magnetic field (dZ/dz) above the slag block from the iron-smelting furnace no. 4. The form of the magnetic anomaly does not correspond entirely with the form of the furnace, which is probably a consequence of its nonhomogeneous composition.



Sl. 8: Cvinger pri Meniški vasi. Magnetometrija (zgoraj) in navidezna magnetna susceptibilnost (spodaj) na območju 2 (sl. 2). Tudi z metodo n.m.s. lahko natančno določimo meje železarskega talilnega kompleksa.

Fig. 8: Cvinger near Meniška vas. Magnetometry (above) and the apparent magnetic susceptibility (below) in area 2 (Fig. 2). The borders of the iron-smelting complex can be precisely delimited also using the apparent magnetic susceptibility method.



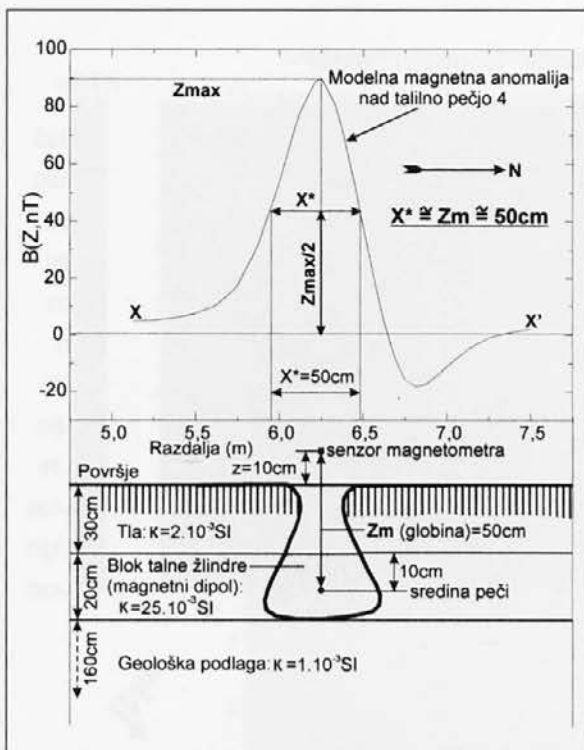
Sl. 9: Cvinger pri Meniški vasi. Primerjava magnetometrije (zgoraj) in navidezne magnetne susceptibilnosti (spodaj) na območju 3 (sl. 2).

Fig. 9: Cvinger near Meniška vas. A comparison between the magnetometry (above) and the apparent magnetic susceptibility (below) in area 3 (Fig. 2).

območju 1 za vsako meritev odstranili 1 dm^2 ruše. Na območju 2 pa smo enako veliko površino samo očistili, da smo dobili ravno površino brez večjih kosov organskih snovi. Razlike v navidez-

ni magnetni susceptibilnosti lahko vidimo na primerjalnem grafu srednjih vrednosti (sl. 6).

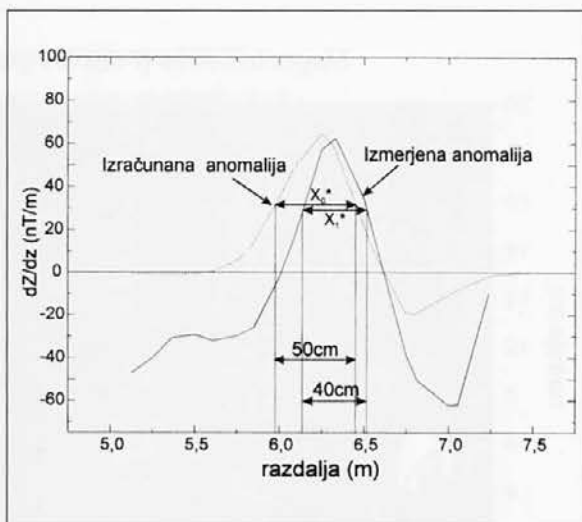
Namen meritev je bil ugotoviti stopnjo korelacije med magnetno karto in karto navidezne mag-



Sl. 10: Cvinger pri Meniški vasi. Izračunana vertikalna komponenta magnetnega polja (Z) za model peči. Globina (Z_m) je približno enaka širini krivulje (X^*) na polovici najvišje amplitude ($Z_{max}/2$) (Telford et al. 1990, 87). Razdalja med višino senzorja (10 cm nad površino) in sredino talilne peči je 50 cm, kar približno ustreza globini peči pod površino (cca. 30 cm).

Fig. 10: Cvinger near Meniška vas. The calculated vertical component of the magnetic field (Z) for the model of the furnace. The depth (Z_m) is approximately equal to the width of the curve (X^*) by half of the highest amplitude ($Z_{max}/2$) (Telford et al. 1990, 87). The distance between the height of the sensor (10 cm above the ground) and the centre of the iron-smelting furnace is 50 cm, which approximately corresponds with the depth of the furnace under the surface (cca. 30 cm).

netne susceptibilnosti. Glede na majhno globino dosega instrumenta Kappameter KT-5, si lahko razlagamo dobro korelacijo obeh kart (sl. 8 in 9) kot močno arheometalurško kontaminacijo tal z železovimi minerali. Ostale mogoče vzroke za povišano navidezno magnetno susceptibilnost, kot je npr. "učinek segrevanja" ("heating effect"), lahko v tem primeru zanemarimo. Onesnaženje s stranskimi produkti metalurgije pri pridobivanju železa ima namreč neprimerno močnejši vpliv na magnetne lastnosti zemljišča kot le konverzija šibkomagnetnih železovih mineralov v bolj magnetne oblike pri visokih temperaturah (glej. npr. Mušič et al. 1995, 6-15; Slapšak et al. 1995). Pri prospekciji na Ajdovščini nad Rodikom smo dokazali, da so višje vrednosti navidezne magnetne sus-



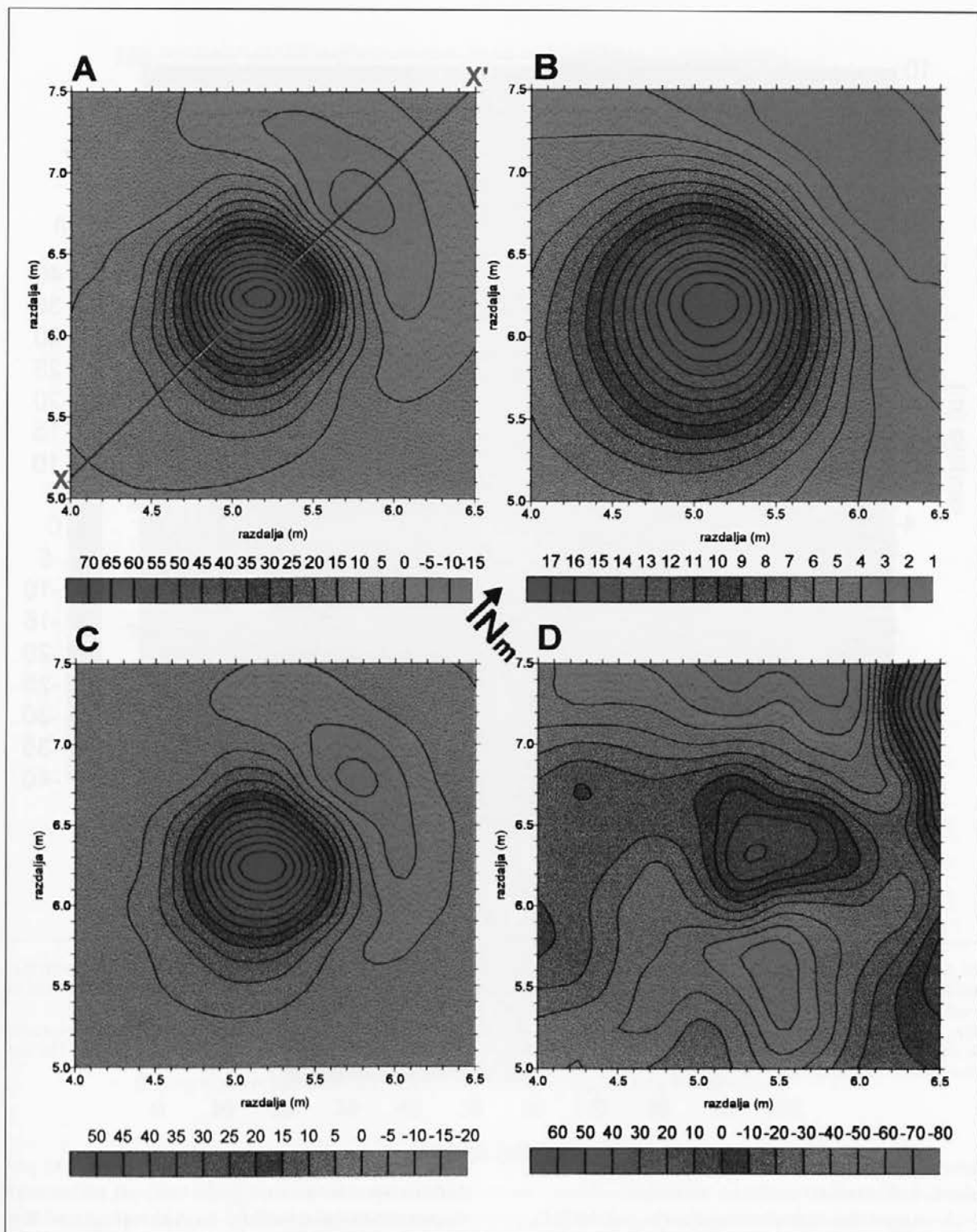
Sl. 11: Cvinger pri Meniški vasi. Izmerjena in izračunana magnetna anomalija nad pečjo št. 4. Vidimo, da se amplitudi anomalij dobro ujemata, kar pomeni, da so vsi določeni parametri v modelu dobri približki dejanskih vrednosti. Grafično ugotovljeni globini se med seboj le malo razlikujeta (za cca. 10 cm). Iz tega lahko zaključimo, da lahko na tem arheološkem najdišču uporabimo enak grafični postopek določanja globin (glej tudi sl. 10).

Fig. 11: Cvinger near Meniška vas. The measured and calculated magnetic anomaly above furnace no. 4. It is evident that the amplitude of anomalies corresponds well, which indicates that all the determined parameters in the model are good approximations of the actual values. Only the graphically determined depths slightly vary (by cca. 10 cm). It can thus be concluded that the same graphic procedure for determining depths can be applied at this site (see also Fig. 10).

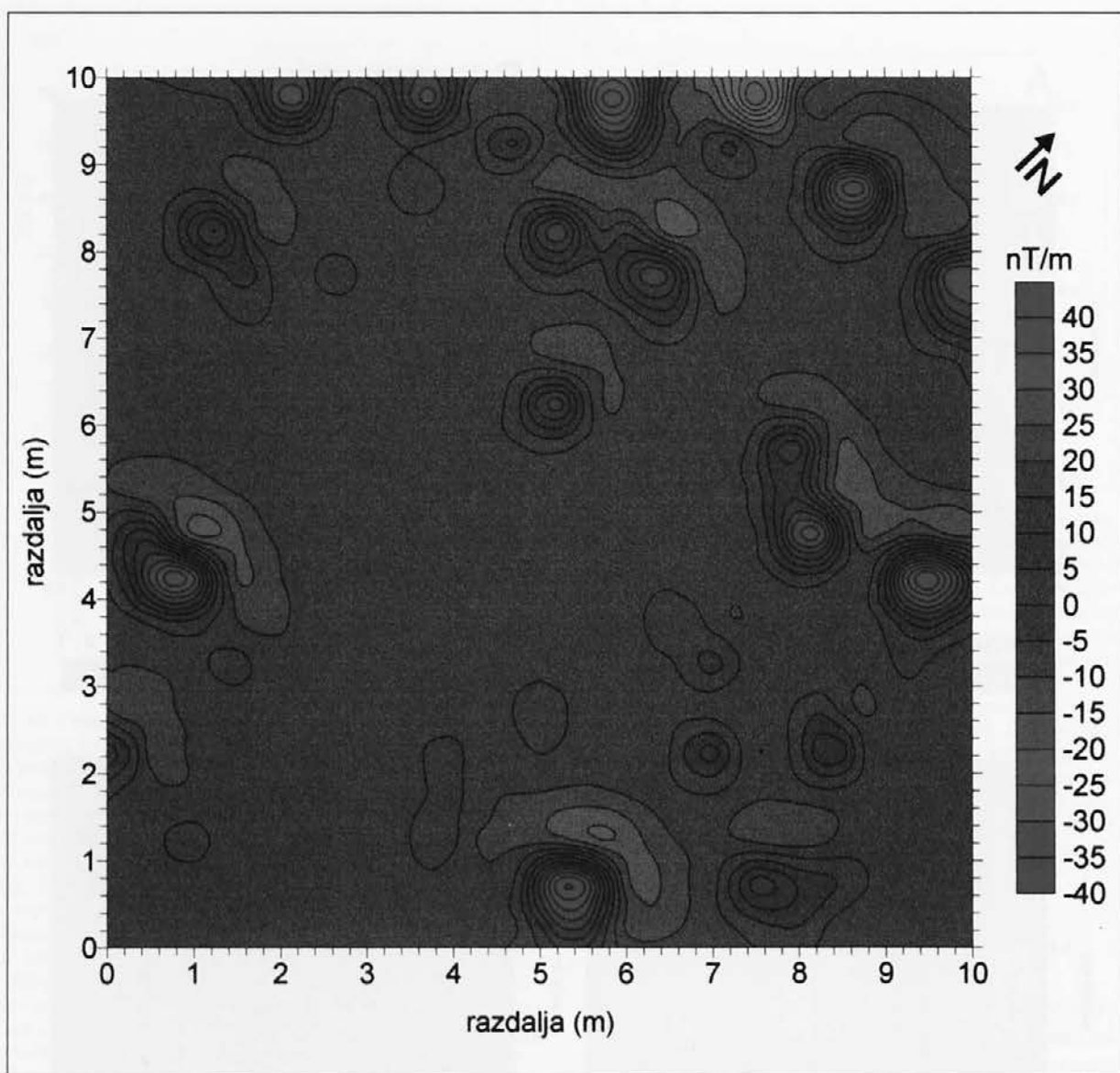
ceptibilnosti od "kritične vrednosti", ki predstavlja mejo, do katere je povišana navidezna magnetna susceptibilnost tal lahko posledica visokih temperatur ("heating effect") pri redukcijski atmosferi, izključno posledica kontaminacije z metalurškim prahom in/ali primesjo keramičnega prahu. Iz rezultatov laboratorijskih analiz je razvidno, da primesi drobcov keramike in odpadnih produktov metalurgije močno vplivajo na zvišanje susceptibilnosti.

Izpostaviti moramo tudi praktični pomen tega testa za arheološko prospekcijo. Če bi se izkazalo, da gre za visoko stopnjo korelacije med obema metodama, bi lahko na podobnih najdiščih, kjer nas zanimajo samo meje industrijske cone, uporabili le metodo navidezne magnetne susceptibilnosti. Prednost te metode je predvsem v njeni uporabnosti, ker je enostavna za delo na terenu in razmeroma preprosta za interpretacijo.

Dabas in sodelavci (1993, 66) so na podlagi rezultatov meritev navidezne magnetne susceptibilnosti (k) z elektromagnetno metodo SH₃ na ar-



Sl. 12: Cvinger pri Meniški vasi. Magnetne anomalije za talno žilindro št. 4, izračunane po predlogi na sl. 7, le da smo korigirali vrednosti magnetne susceptibilnosti (sl. 10). A: $z_1 = 0,1$ m, B: $z_2 = 0,6$ m, C: gradient $z_1 - z_2$, D: reziduali: izmerjene (dZ/dz) - izračunane (dZ/dz). Reziduali smo uporabili za preverjanje uporabljenega modela predvsem kar se tiče izbranih vrednosti n.m.s. Najbolj ustrezen je tisti model, pri katerem je razlika med izmerjeno in izračunano magnetno anomalijo najmanjša. Fig. 12: Cvinger near Meniška vas. The magnetic anomalies for slag block no. 4, calculated according to the proposal in Fig. 7, only that the value of magnetic susceptibility was corrected (Fig. 10). A: $z_1 = 0,1$ m, B: $z_2 = 0,6$ m, C: gradient $z_1 - z_2$, D: residuals: measured (dZ/dz) - calculated (dZ/dz). The residua were used to check the applied model, especially concerning the selected apparent magnetic susceptibility values. The most appropriate model is the one where the difference between the measured and the calculated is the slightest.



Sl. 13: Cvinger pri Meniški vasi. Izračunane (modelne) magnetne anomalije za območje arheološke sonde. Kot geometrijski model smo za modeliranje magnetnih anomalij blokov talnih žlindre uporabili nizek pokončni valj. Premer takšnega valja za vsak blok žlindre ustreza izolinijam 50nT/m na sl. 3.

Fig. 13: Cvinger near Meniška vas. Calculated (modelled) magnetic anomalies in the area of the archaeological excavations. A short vertical cylinder was used as the geometric model for modelling the magnetic anomalies of slag-pit blocks. The circumference of the cylinder corresponds with the 50 nT/m contour line for each slag block (Fig. 3).

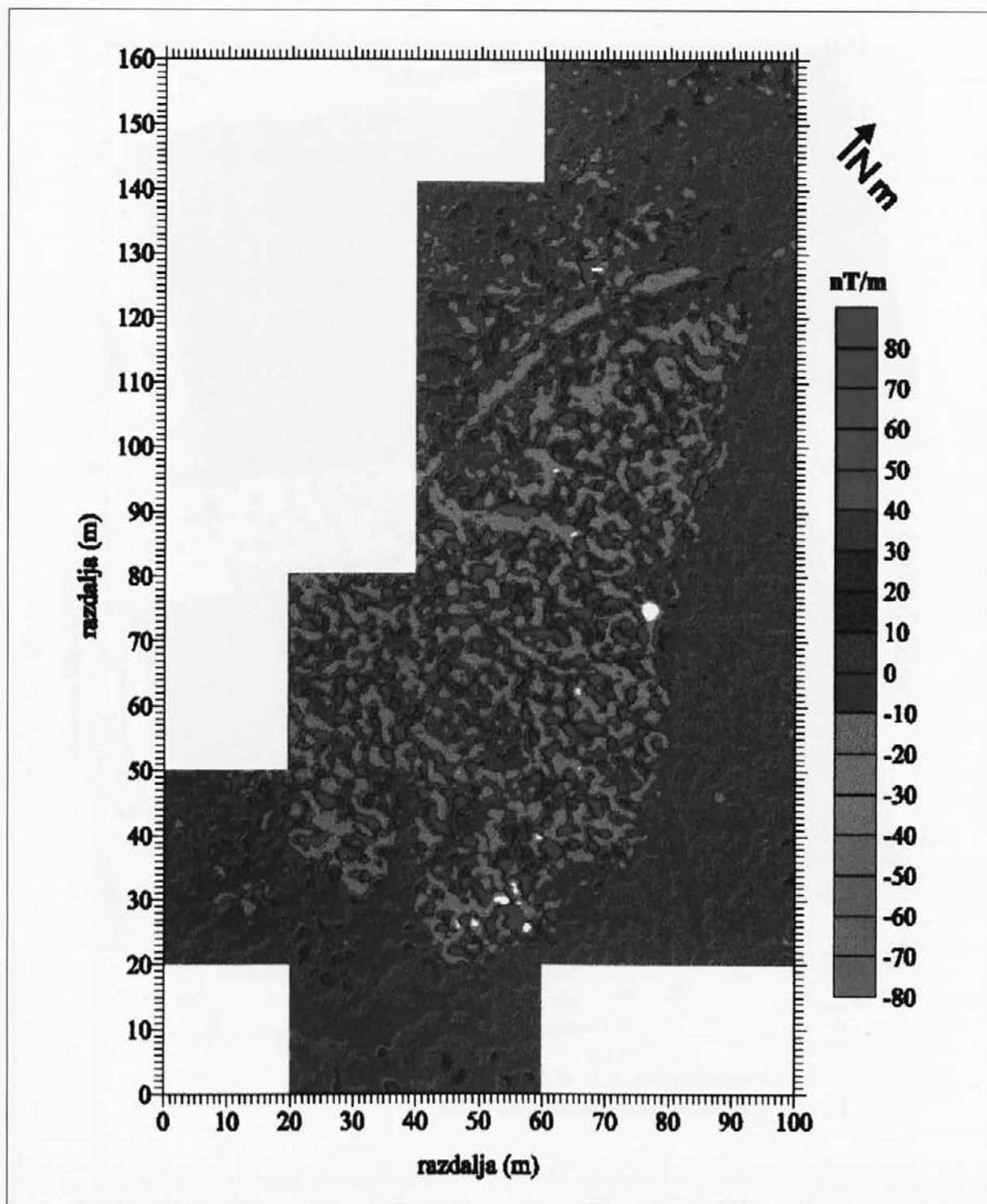
heološkem najdišču Milanówek - Felecin na Poljskem definirali tri različna območja:

1. magnetno "tihu" območje ($k < 2 \cdot 10^{-3} \text{SI}$),
2. vmesno, prehodno območje ($2 \cdot 10^{-3} \text{SI} < k < 3 \cdot 10^{-3} \text{SI}$),
3. močno magnetno območje ($3 \cdot 10^{-3} \text{SI} < k < 8 \cdot 10^{-3} \text{SI}$).

Avtorji navajajo, da se žlindre pojavljajo samo na območju z vrednostmi k višjimi od $2 \cdot 10^{-3} \text{SI}$. Nadalje so ugotovili dobro pozitivno korelacijo med k in količino žlindre na površinsko enoto in

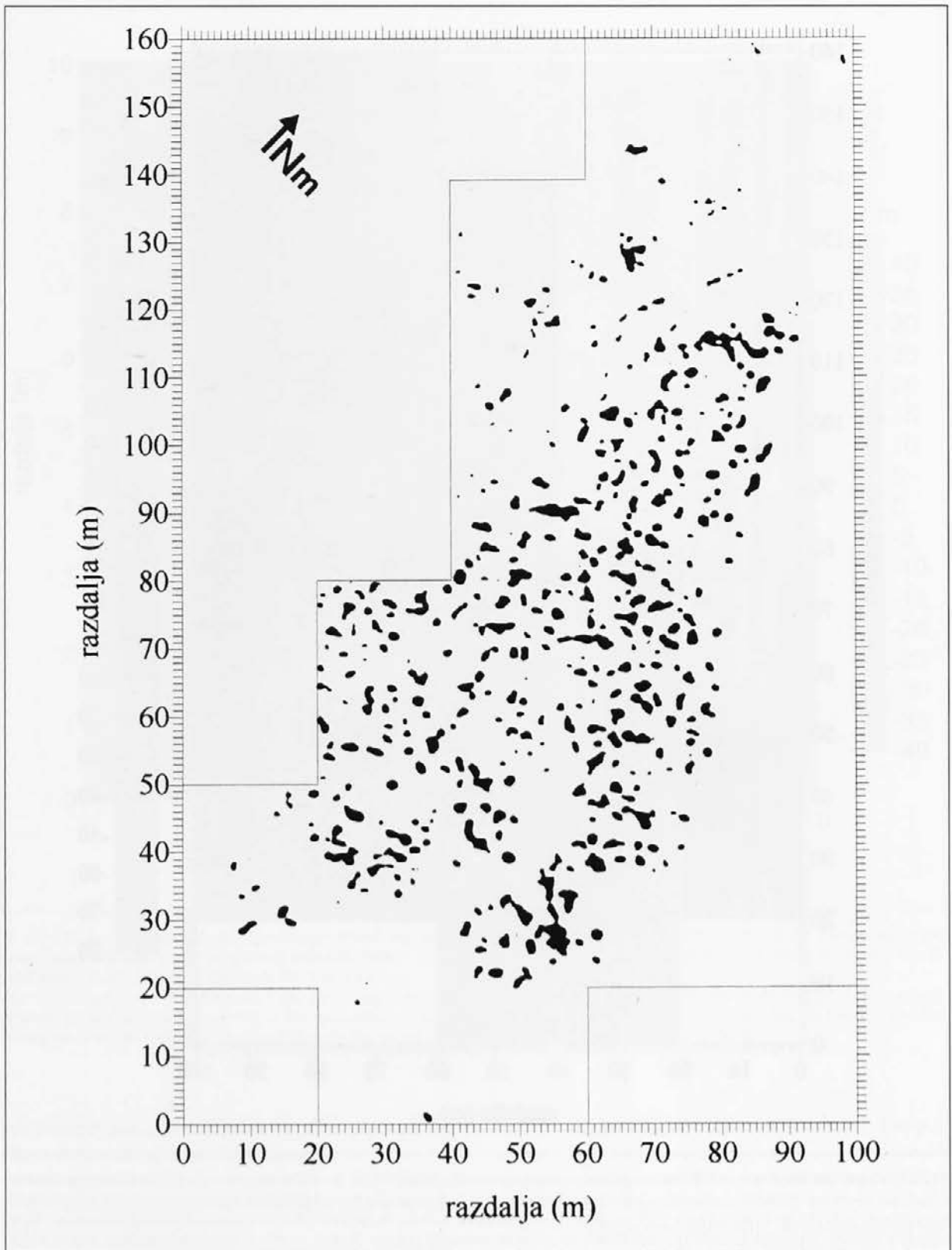
k ter visokimi magnetnimi amplitudami. Do podobnih ugotovitev smo prišli tudi pri raziskavah na poznoantični naselbini na Ajdovščini nad Rodikom (glej Slapšak et al. 1995).

Na Cvingerju smo ugotovili, da so vrednosti navidezne magnetne susceptibilnosti znotraj talilnega kompleksa (sl. 2, območje 3 in sl. 9) v povprečju približno petkrat višje ($k_m = 4,16 \cdot 10^{-3} \text{SI}$), kot na njegovem obrobju ($k_m = 0,82 \cdot 10^{-3} \text{SI}$), kjer smo zajeli del talilnega kompleksa in del nekontaminirane površine (sl. 2: območje 2 in sl. 8). Ve-



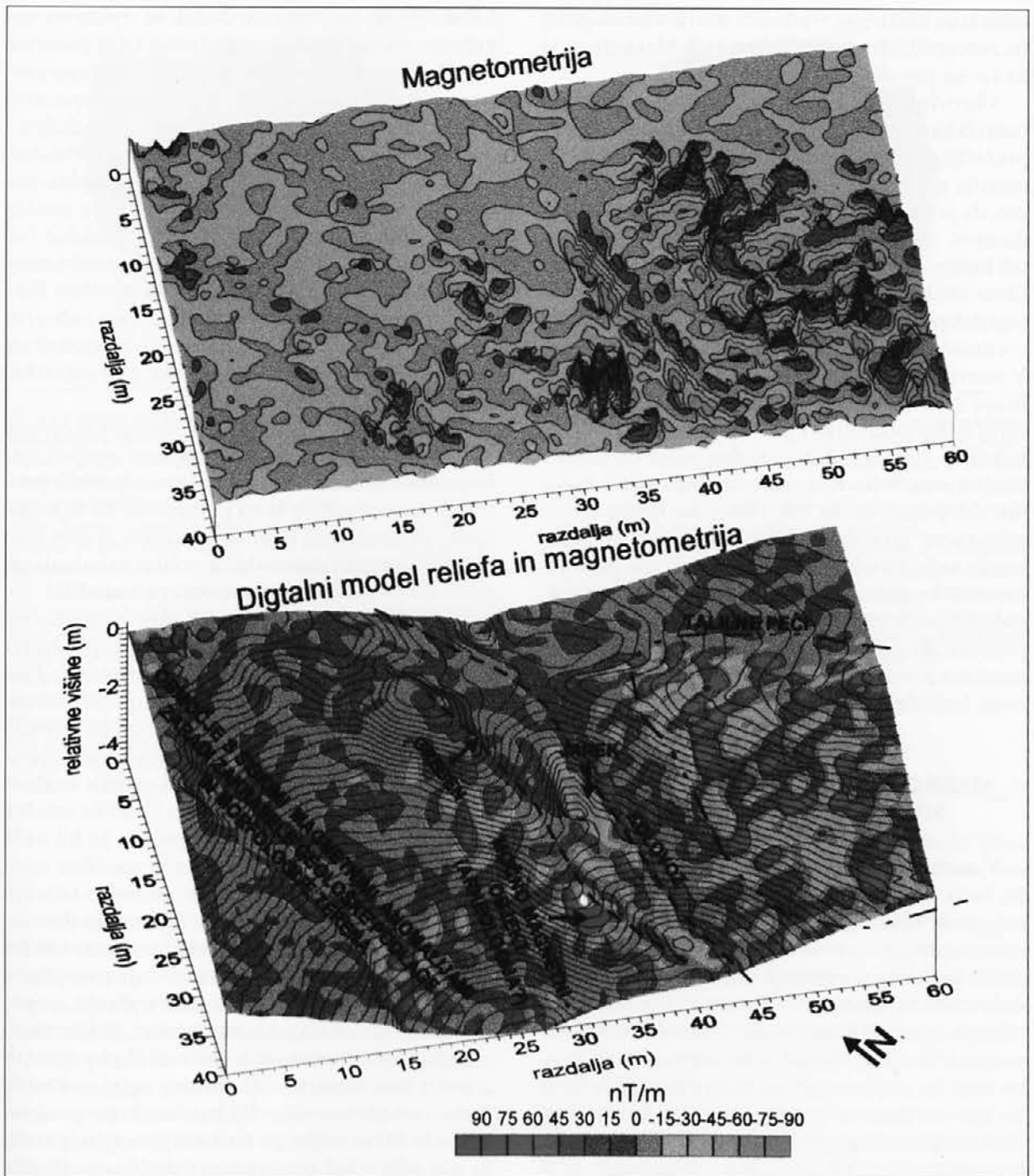
Sl. 14: Cvinger pri Meniški vasi. Karta magnetnih anomalij (vertikalni gradient gostote magnetnega polja- dZ/dz) za celotno raziskano površino. Najvišji gradienti so bili ugotovljeni na mestih, kjer se plitvo pod površino nahajajo ostanke železnodobnih talilnih peči (bloki talne žlindre), ki predstavljajo objekte z močno inducirano/termoremanentno magnetizacijo. Ta se odraža v izrazito bipolarnem značaju izmerjenih magnetnih anomalij (rdeče: močni pozitivni gradienti; modro: močni negativni gradienti). Lepo so vidne tudi meje industrijske cone.

Fig. 14: Cvinger near Meniška vas. A map of the magnetic anomalies (the gradient of the vertical component of the magnetic field - dZ/dz) for the entire investigated surface. The highest gradients were determined in areas where remains of Iron Age iron-smelting furnaces (slag-pit blocks), which represent objects with intense induced/thermoremanent magnetisation, are situated shallow under the surface. This is reflected in the extremely bipolar characteristic of the measured magnetic anomalies (red: intense positive gradients; blue: intense negative gradients). The borders of the industrial zone are also clearly evident.



Sl. 15: Cvinger pri Meniški vasi. Interpretacija karte magnetnih anomalij. Prikazana so samo območja z gradienti vertikalne komponente magnetnega polja 30 nT/m in več. Ta polja predstavljajo magnetni efekt blokov talnih žlinder. V večini primerov gre za skupine treh ali več peči.

Fig. 15: Cvinger near Meniška vas. An interpretation of the map of magnetic anomalies. Only the areas with gradients of vertical components of the magnetic field measuring 30 nT/m and higher are depicted. These fields represent the magnetic effect of blocks of underground slag. In most cases they are groups of three or more furnaces.



Sl. 16: Cvinger pri Meniški vasi. Digitalni model reliefa na območju 1 (sl. 2) smo uporabili za oceno velikosti naravnih magnetnih anomalij, ki so posledica t. i. "topografskega efekta". Zakrasela geološka podlaga, razgibano površje in visok kontrast v n.m.s. med ilovnatimi tlemi (jerino) in apnencem so lahko izvor magnetnih anomalij, ki jih moramo pri interpretaciji upoštevati.

Fig. 16: Cvinger near Meniška vas. A DEM of area 1 (Fig. 2) was used to provide an estimate of the size of the natural magnetic anomalies that resulted from the "topographic effect". The basic karst geology, the dynamic surface and the high contrast between the apparent magnetic susceptibility of loamy soil and limestone can all affect the magnetic anomalies and must be considered when interpreting.

likostni red izmerjenih vrednosti navidezne magnetne susceptibilnosti ustreza ugotovitvam Dabasa in sodelavcev (1993, 66).

Nadalje smo ugotovili, da lahko na takšnih arheoloških najdiščih uporabimo za ugotavljanje meja železarskih talilnih kompleksov namesto magne-

tometrije kartirane vrednosti navidezne magnetne susceptibilnosti. Za enkrat to lahko trdimo le za ravne površine (sl. 8).

S kartiranjem navidezne magnetne susceptibilnosti lahko pripomoremo tudi k popolnejši interpretaciji magnetometrije. Po rezultatih magnetometrije na sl. 9 (glej tudi sl. 2: območje 3), vidimo, da je število visokih točkovnih magnetnih gradientov, ki predstavljajo učinek močno magnetnih blokov talnih žlinder na površinsko enoto, približno enako. Na karti navidezne magnetne susceptibilnosti (sl. 9, spodaj) vidimo, da so bile najvišje vrednosti izmerjene le na sredini tega območja. V smeri proti vzhodu so vrednosti navidezne magnetne susceptibilnosti enake naravnemu ozadju, torej nekontaminirani površini. Proti zahodu so nekoliko višje, vendar še vedno nižje od tistih v centralnem delu. Ker pobočje pada proti zahodu, sklepamo, da so bili vrhnji horizonti tal na vzhodnem, izravnanim delu območja, ki so prvotno najbrž vsebovali veliko odpadnih produktov metalurgije, preneseni s procesi eksogene dinamike proti zahodu v smeri padca pobočja. To pomeni, da na strmem pobočju s to metodo ne moremo povsem natančno ugotoviti meje talilne kompleksa.

MAKROSKOPSKI OPISI PRODUKTOV METALURŠKIH AKTIVNOSTI

V nadaljevanju podajamo makroskopske opise, teže in navidezno magnetno susceptibilnost nekaterih kosov žlindre, ki smo jih pobrali pri nesistematičnem terenskem pregledu v novembru 1997. Terenski pregled je vodil Lionel Orenge, doktorant na Univerzi v Dijonu, ki raziskuje metalurgijo v mlajši železni dobi v južni Franciji (Auvergne). Terenski obhod je bil napravljen po tem, ko smo že imeli rezultate magnetometrije in je bil zato že znan tudi obseg talilnega kompleksa. Namen terenskega pregleda je bil dobiti značilne vzorce odpadnih produktov metalurgije, ki bi jih lahko uporabili kot pomemben dokaz za opredelitev tipa železarskih metalurških procesov.

Skupno smo pobrali približno 7 kg raznih žlinder. Vsi vzorci kažejo značilne znake metalurških aktivnosti za pridobivanje železa, in sicer preproste postopke talilništva (reduciranje železove rude). Iz skupne pobrane mase vzorcev so bili določeni trije glavni tipi železove žlindre. Vzorci so bili nato stehtani in makroskopsko opisani. Ma-

kroskopskim opisom smo dodali še vrednosti navidezne magnetne susceptibilnosti (Kappameter KT-5) za posamezne vzorce ali skupine vzorcev. S tem smo želeli ugotoviti ali je mogoče uporabiti navidezno magnetno susceptibilnost kot dodatni razločevalni kriterij za posamezne tipe žlinder. Hkrati nas je zanimal celotni razpon vrednosti navidezne magnetne susceptibilnosti za vse značilne tipe žlinder, ki se pojavljajo na najdišču (sl. 6). To smo uporabili tudi za oceno najustreznejše navidezne magnetne susceptibilnosti talnih žlinder pri magnetnem modeliranju. Za natančnejšo interpretacijo talilniškega procesa bo potrebno opraviti še nekatere metalografske, petrografske, mineraloške in kemične analize.

V slovenskem prevodu makroskopskih opisov vzorcev žlinder smo obdržali nekatere uveljavljene francoske izraze za določene tipe odpadnih produktov metalurgije, ki so pomembni za dokazovanje ekstenzivnih talilnih procesov. S tem smo se želeli izogniti morebitnim večjim napakam pri prevodu originalnega francoskega besedila.

Dokaz ekstenzivnih talilnih procesov s pečmi za enkratno uporabo so kosi žlindre, ki predstavljajo odlomke blokov talne žlindre (*fond de four en fosse*). Talilne peči, ki so bile v uporabi v centralni Evropi ob koncu železne dobe in v antiki (Bielenin et al. 203-224), so producirale odpadne produkte pri taljenju v obliki velikih ovalnih kosov žlindre (Tylecote 1987, 311), ki so ostali v jami na dnu talilne peči po tem, ko je bil volk odstranjen (sl. 5). Za te žlindre je značilna visoka specifična teža. So stranski produkti taljenja železove rude, ki so se usedli v jamo na dnu talilnih peči. V glavnem predstavljajo odlomke bloka raznih talilnih produktov, ki običajno nastajajo blizu centra najvišjih temperatur v plavžu, neposredno ob odprtini za dovajanje zraka. Takšni bloki so lahko zelo heterogene sestave. V glavnem jih gradijo kosi žlindre, volk, drobcji oglja in kosi le delno reducirane rude. Po končanem procesu taljenja je bil iz takšnega bloka odstranjen le volk, ki je predstavljal surovino za nadaljnje postopke čiščenja. Ves ostali material v plavžu je bil za takratne postopke pridobivanje železa neuporaben in je zato običajno ostal kar na prvotnem mestu - v jami na dnu talilne peči.

Vzorec št. 1 (sl. 17-19): Fragment bloka talne žlindre (*fond de four en fosse*), ki meri po daljši osi 10 cm, tehta 2055 g in je močno magneten ($k_m = 39,10 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_s = 5,36 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_{\min} = 29,10 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_{\max} = 51,40 \cdot 10^{-3} \text{SI}$).¹ Kos je zanimiv, ker lahko

¹ k_m = srednja vrednost navidezne magnetne susceptibilnosti, k_s = standardni odklon n.m.s., k_{\min} = najnižja vrednost n.m.s., k_{\max} = najvišja vrednost n.m.s.



Sl. 17: Cvinger pri Meniški vasi. Vzorec št. 1: odlomek bloka talne žindre, dno talilne peči (*fond de four en fosse*). Pri stranskem pogledu ločimo spodnji kompaktni in zgornji luknjičavi del. Luknjice so ostale od zračnih mehurčkov, ki so bili ujeti v staljeni žindri, ko se je ta na hitro ohladila in strdila. Večje luknje z ravnimi robovi so posledica odtisov oglja v staljeni žindri. Levi, zaobljeni rob predstavlja negativ oblike jame na dnu peči, ki je bila namenjena stekanju žindre Fig. 17: Cvinger near Meniška vas. Sample no. 1: a fragment of a slag-pit block (*fond de four en fosse*). A lower compact layer and an upper poriferous layer can be discerned from the side view. Pores were created by air bubbles that were trapped in the melted slag when it cooled off and hardened abruptly. Larger pores with straight edges are the result of impressions of charcoal in the melted slag. The left, rounded edge represents the negative of the shape of the pit at the floor of the furnace which was intended for the concourse of the melting slag.

že iz njegove oblike sklepamo na prvotni položaj v jami na dnu talilne peči (Tylecote 1987, fig. 8.4). Podajamo opise za tri površine istega vzorca. *Površina 1* je lepo zaobljena in nakazuje obliko dna talilne peči. Najverjetneje gre za del bloka talilnih produktov na stiku z dnom peči (sl. 17). *Površina 2* je nepravilne oblike, ki je nastala z akumulacijo drobcev nataljene žindre (*faciès coulée*), ki so padali na površino že strjenega bloka žindre. Drobci žindre so se najverjetneje natalili med kosi oglja v zgornjih delih plavža, kjer so bile višje temperature. Do tega pojava je najverjetneje prihajalo na spodnji strani bloka talilnih produktov (*massiau*), ki se je formiral neposredno na plasti oglja (Dunikowski et al. 86-100) (sl. 18). *Površina 3* je prav tako nepravilne oblike, ki pa je posledica odtisov drobcev oglja. Najverjetneje gre za zgornjo površino talne žindre (*fond de four en fosse*) (sl. 19).

Vzorec št. 2: Fragment bloka talne žindre (*fond de four en fosse*), ki meri po daljši osi 15 cm, tehta 3270 g in je močno magneten ($k_m = 51,28 \cdot 10^{-3} \text{SI}$).



Sl. 18: Cvinger pri Meniški vasi. Vzorec št. 1: odlomek bloka talne žindre - dno talilne peči (*fond de four en fosse*). Pogled z vrha na zgornji, lažji in luknjičavi del. Površina je prekrita z drobnimi okroglimi luknjicami, ki so posledica v staljeni žindri ujetih zračnih mehurčkov. Večje luknje pravilnejših oblik z ravnimi robovi so odtisi drobcev oglja.

Fig. 18: Cvinger near Meniška vas. Sample no. 1: a fragment of a slag-pit block (*fond de four en fosse*). Viewed from above upon the upper, lighter and poriferous part. The surface is covered with tiny round pores that are the result of air bubbles trapped in the melted slag. Larger pores with straight edges are the result of impressions of charcoal.

^3SI , $k_s = 20,42 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_{\min} = 27,89 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_{\max} = 87,69 \cdot 10^{-3} \text{SI}$).

Vzorec št. 3: Fragment bloka talne žindre (*fond de four en fosse*), ki meri po daljši osi 4,5 cm, tehta 512 g in je srednje magneten ($k_m = 17,05 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_s = 2,69 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_{\min} = 12,50 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_{\max} = 21,51 \cdot 10^{-3} \text{SI}$).

Vzorec št. 4 (sl. 21): (skupina vzorcev steklaste žindre). Skupna značilnost teh žindrer je, da so luknjičave in zelo lahke, ker jih gradijo v glavnem silikatni minerali. Skupna teža vseh žindrer znaša 842 g. So šibko magnetne ($k_m = 6,08 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_s = 5,67 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_{\min} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_{\max} = 19,20 \cdot 10^{-3} \text{SI}$). Mestoma se jih oprijema žgana glina. To je najverjetneje posledica taljenja notranjih delov glinastega ostenja peči.

Vzorec št. 5 (sl. 22): (skupina vzorcev nataljene žindre z zaobljeno površino - *faciès coulée*) (sl. 22). Te žindre so goste in nastajajo pri vseh stopnjah metalurških procesov za pridobivanje železa, kakor tudi pri kovanju železa. Zato natančnejša interpretacija brez metalogenetskih analiz ni mogoča. Skupna teža 10 fragmentov te žindre znaša 200 g. Eden od možnih načinov nastanka je ta, ki smo ga opisali pri Vzorecu 1, površina 2, le da je očitno, da ti kosi niso bili del bloka talilnih produktov. Vsi vzorci tega tipa so zelo šibko mag-



Sl. 19: Cvinger pri Meniški vasi. Vzorec št. 1: odlomek bloka talne žlindre - dno talilne peči (*fond de four en fosse*). Pogled na spodnjo stran. Na ravni površini vidimo drobne zaobljene kupčke žlindre z visokim sijajem. Ti so nastali iz staljenih drobcev žlindre, ki so padali na že ohlajeno in strjeno talno žlindro.

Fig. 19: Cvinger near Meniška vas. Sample no. 1: a fragment of a slag-pit block (*fond de four en fosse*). Viewed from below. Small rounded heaps of shiny slag are visible upon the flat surface. These are the result of melted fragments of slag that fell upon the cooled and hardened underground slag.



Sl. 20: Cvinger pri Meniški vasi. Gomoljasta limonitna koncentracija oz. bobova železova ruda - bobovec, kakršno so najverjetneje uporabljali tudi železnodobni železarji na Cvingerju pri Meniški vasi. Lepo je vidna skorjasta struktura, ki je posledica koncentričnega nalaganja železovih oksidov in hidroksidov (vzorec je odstopil Borut Križ).

Fig. 20: Cvinger near Meniška vas. A bulged limonite concretion, or rather, bog iron ore, similar to what was probably used by the Iron Age ironworkers at Cvinger near Meniška vas. The crusted structure which resulted from the concentric lading of iron oxides and hydroxides (Borut Križ provided the sample).

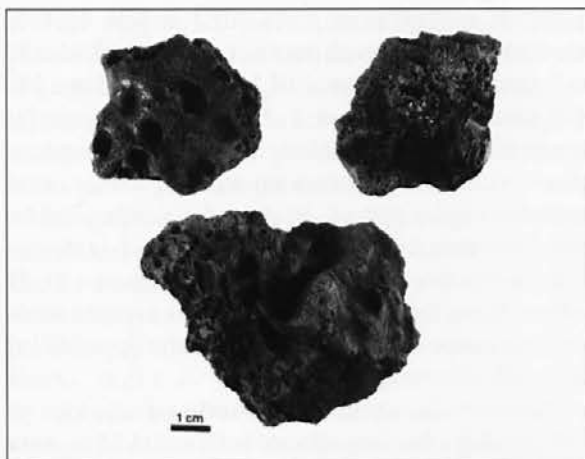
netni ($k_m = 1,92 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_s = 0,73 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_{\min} = 0,97 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_{\max} = 3,45 \cdot 10^{-3} \text{SI}$).

MAGNETNO MODELIRANJE (FIZIKALNO-ARHEOLOŠKI MODEL)

Cilj modeliranja magnetnih anomalij je korigiranje vhodnih parametrov tako, da je končna razlika med izračunanimi in izmerjenimi anomalijami kar najmanjša. Na podlagi parametrov, ki smo jih uporabili pri računanju tri-dimenzionalnega modela, lahko posredno interpretiramo izmerjene anomalije.

Teoretično je lahko magnetna anomalija na Zemljinem površju posledica kombinacije neskončnega števila različnih magnetnih polj. Enako magnetno anomalijo, ki je posledica razlik v inducirani magnetizaciji, npr. povzročita razmeroma homogeno magnetno telo in manjši, izolirani magnetni objekti iz enake snovi, ki so enakomerno dispergirani v večji prostornini. Zato je pri interpretaciji magnetometrije bistveno vodilo predznanje, ki ga imamo o ciljnih objektih (npr. bloki talne žlindre talilnih peči) in sredstvu v katerem so (npr. ilovica in apnenc). Za oceno oblike, velikosti in globine arheoloških ciljnih objektov, ki so običajno majhni in so plitvo pod površjem, običajno upo-

rabljamo metodo tridimenzionalnega magnetnega modeliranja (glej npr. Godson 1983). Osnovni princip je ta, da z najustreznejšim izrazom za naš problem izračunamo fizikalno polje, npr. vertikalno komponento gostote magnetnega polja nekega preprostega geometrijskega telesa (krogla, pokončni valj, večstrana prizma in ravna ploskev) (Telford et al. 1990, 84-105), ki je po obliki in razmerju med tremi prostorskimi dimenzijami čim bolj podoben pričakovani obliki našega iskanega arheološkega objekta. Za uspešno magnetno modeliranje potrebujemo kar najbolj natančno oceno nekaterih fizikalnih parametrov, kot je tip magnetizacije (inducirana in/ali remanentna magnetizacija) in kontrast v magnetni susceptibilnosti med arheološkim objektom in medijem v katerem je. Poznati moramo seveda tudi ustrezno oceno deklinacije, inklinacije in jakosti Zemljinega magnetnega polja na prostoru, kjer se nahajajo arheološke ostaline. Skoraj vedno razpolagamo s podatki, ki nam zadovoljivo opišejo osnovne magnetne značilnosti ciljnih objektov, ki jih iščemo, in medija v katerem so. Vprašanja na katera želimo odgovoriti z magnetnim modeliranjem so različna in odvisna od tipa arheološkega najdišča in narave posamičnih arheoloških ciljnih objektov. Praktični smisel magnetnega modeliranja je ugotoviti geometrijske parametre arheološkega ob-



Sl. 21: Cvinger pri Meniški vasi. Vzorec št. 4: skupina vzorcev steklaste žindre. Skupna značilnost teh žindrov je, da so luknjičave in zelo lahke, ker jih gradijo v glavnem silikatni minerali. Mestoma se jih oprijema žgana glina. To je najverjetneje posledica taljenja notranjih delov glinastega ostenja peči.

Fig. 21: Cvinger near Meniška vas. Sample no. 4: a group of samples of glassy slag. The common characteristic among this slag is that it is all porous and very light as it is composed predominantly of silicate minerals. Burned clay clings to the samples in places; this is probably the consequence of smelting the inner parts of the clay walls of the furnace.

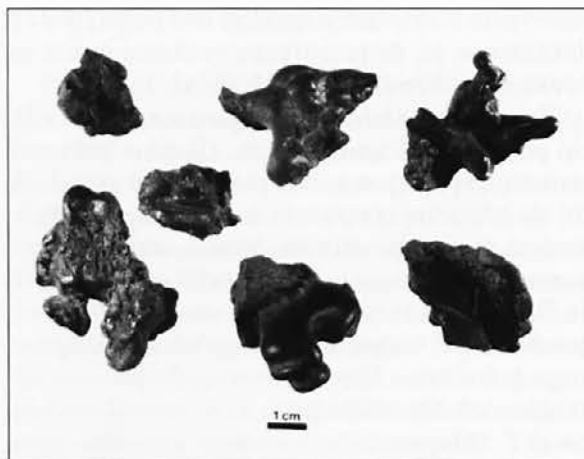
jekta kot so položaj, oblika, velikost in globina. Med najpogostejšimi vprašanji, na katera lahko zadovoljivo odgovorimo, je globina na kateri je arheološki objekt.

Postopki magnetnega modeliranja

Glede na pričakovano obliko objektov se odločimo za najprimernejši geometrijski model. Za naš primer, ko pričakujemo približno sferične objekte talnih žindrov, bi lahko uporabili model krogle z uniformno distribucijo magnetizacije (točkovni dipol), ki je na globini, ki je enaka razdalji od površine do sredine objekta, kot so to na podobnem arheološkem najdišču naredili Smekalova in sodelavci (1993, 87).

Iz rezultatov arheoloških izkopavanj (Križ 1993, 86) vemo, da so oblike in velikosti talnih žindrov zelo različne. So takšne z krožnimi, kvadratnimi in elipsoidnimi horizontalnimi preseki. Za magnetno modeliranje je pomembna ugotovitev, da je pričakovana višina telesa (z) talne žindre običajno najkrajša dimenzija. V nekaterih primerih znaša celo manj kot 1/4 srednje vrednosti dolžine (x) in globine (y) (sl. 7).

Zaradi tega ocenjujemo, da je kratek pokončni valj najustreznejša geometrijska oblika za mag-



Sl. 22: Cvinger pri Meniški vasi. Vzorec št. 5: skupina vzorcev nataljene, goste žindre z zaobljeno površino (*faciès coulée*). Te žindre nastajajo v vseh fazah metalurških procesov za pridobivanje železa in tudi pri kovaštvu.

Fig. 22: Cvinger near Meniška vas. Sample no. 5: a group of smelted, dense fragments of slag with rounded off surfaces (*faciès coulée*). Such pieces of slag form during all levels of metallurgic processes for the extraction of iron, as well as during the forging of iron.

netno modeliranje jamic, zapoljenih s talnimi žindromi. Že Abrahamsen (1965, 115-132) je predlagal kratek pokončni valj kot ustrezno alternativo preprostemu modelu jamice s talno žindro v obliki magnetnega dipola, ki je nagnjen, strmo pada in predstavlja ekvivalent homogeno magnetiziranega sferičnega telesa, ki ga kot ustrezen model predlagajo Smekalova in sodelavci (1993, 87).

Za karakteristično magnetno susceptibilnost talnih žindrov smo na začetku vstavili srednjo vrednost ($k_m = 9,56 \cdot 10^{-3} \text{SI}$), ki smo jo izračunali na podlagi meritev na površini edine izkopane talilne peči, ki smo jo imeli v celoti na razpolago (sl. 3: peč št. 4 in sl. 7). Izkazalo se je, da je bila k_m veliko prenizka za ustrezno oceno povprečne k za vse talne žindre. Za preverjanje natančnosti vhodnih parametrov za tridimenzionalno magnetno modeliranje smo uporabili vertikalno komponento magnetnega polja (Z) nad pečjo št. 4 in postopek, ki ga predlagajo Telford in sodelavci (1990, 87,88) za izolirane dipole. Magnetno susceptibilnost smo morali korigirati, ker je glede na rezultate 31 meritev na njeni površini ta zelo neenakomerno distribuirana po masi talne žindre ($k_{\min} = 1,34 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_{\max} = 21,89 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_m = 9,56 \cdot 10^{-3} \text{SI}$ in $k_s = 4,6510^{-3} \text{SI}$). Najbrž gre za zelo nehomogena telesa, pri katerih je kompaktno jedro bloka talne žindre najbolj magnetno. To vrednost smo nato korigirali tako, da smo primerjali modelno, izračunano magnetno anomalijo (sl. 10) z

izmerjeno magnetno anomalijo nad pečjo (*sl. 11*). Izkazalo se je, da je ustrezna vrednost n.m.s. za bloke talne žlindre okoli $25 \cdot 10^{-3} \text{SI}$.

Za višino modelnih valjev smo upoštevali višino peči št. 4, ki znaša 20 cm. Globina peči pod današnjim površjem je bila približno 30 cm (*sl. 7*). To sta bili edini spremenljivki, ki ju med modeliranjem nismo spreminjali. Višino senzorjev smo spreminjali, in sicer je bila 10 in 20 cm (z_1) oz. 60 in 70 cm (z_2). Ker so magnetne anomalije odvisne predvsem od magnetne susceptibilnosti magnetnega jedra talne žlindre, ni mogoče povsem natančno določiti oblike peči. To je lepo vidno tudi na *sl. 7*. Sklepamo, da je mogoče natančno določiti le velikost magnetnega jedra talne žlindre. Premer nizkih pokončnih valjev, ki predstavljajo geometrijski model teh jeder, smo določili na podlagi izmerjenih gradientov (dZ/dz) (*sl. 3*). Iz te karte magnetnih anomalij (*sl. 2*: območje sonde) smo izbrali za približen premer valja, ki določa magnetni efekt talne žlindre, izolinije 50 nT/m (*sl. 3*). Po rezultatih magnetnega modeliranja vidimo (*sl. 10, 11* in *12*), da so bili vsi vhodni parametri nastavljeni zadovoljivo natančno, da lahko že na podlagi stopnje korelacije med rezultati magnetnega modeliranja in izmerjenimi vrednostmi podamo natančno interpretacijo izmerjenih magnetnih anomalij.

Magnetno polje tako pripravljenih modelov smo izračunali z uporabo računalniškega programa Magpoly (Godson 1983). Ta program računa magnetni efekt tridimenzionalnih teles, ki sestojijo iz prisekanih prizm, ki so naložene ena vrh druge. V tlorisu tvorijo poligonalne oblike (Plouff 1975). Za kalkulacijo totalnega magnetnega polja uporabljamo eksaktno enačbo $T = (IH + X)^2 + (mH + Y)^2 + (nH + Z)^2 - H$ (H je jakost Zemljinega magnetnega polja; X , Y , in Z so komponente magnetne anomalije vzdolž treh pravokotnih osi; l , m , in n so kosinusi smernega kota vektorja totalnega Zemljinega magnetnega polja). Rezultat magnetnega modeliranja za območje sonde (*sl. 3*) vidimo na *sl. 13*.

INTERPRETACIJA MAGNETOMETRIJE

Za interpretacijo magnetnih anomalij na celotnem raziskanem območju smo uporabili empirični pristop. Upoštevali smo intenziteto in obliko magnetne anomalije nad talno žlindro talilne peči št. 4, katere položaj na terenu je bil znan iz predhodnih arheoloških izkopavanj (*sl. 3* in *7*) (Križ 1993, 86). To magnetno anomalijo smo nato primerjali z ostalimi izmerjenimi anomalijami (*sl. 14*). Vseh meritev gradienta vertikalne kom-

ponente magnetnega polja (dZ) je bilo 42.400, srednja vrednost vseh meritev (dZ_m) je 0,45 nT/m, standardni odklon (dZ_s) pa 26,96 nT/m. Visok standardni odklon kaže na širok razpon izmerjenih vrednosti. Glede na to, da je razporeditev vrednosti podobna normalni gaussovi razporeditvi (glej npr. *sl. 2*: območje sonde), lahko privzamemo, da je približno 99 % vseh izmerjenih vrednosti v območju od -80,43 nT/m in +81,33 nT/m. Zunaj tega območja so samo ekstremno močne anomalije nad bloki talne žlindre in v bližini železnih predmetov.

Na območju arheološke sonde (*sl. 2*), kjer je bila razdalja med merilnimi točkami 0,25 m, razdalja senzora magnetometra od površine pa 10 cm, smo ugotovili, da so vrednosti magnetnih anomalij blokov talne žlindre tiste, ki so višje od enega standardnega odklona ≈ 50 nT/m (*sl. 3* in *4*). Razdalja med merilnimi točkami na ostali raziskani površini je bila 0,5 m, razdalja senzora magnetometra od površine pa približno 20 cm. Zaradi manjše gostote meritev in nekoliko večje razdalje senzora od površine so bile magnetne anomalije v splošnem nekoliko šibkejše. Za interpretacijo celotne raziskane površine smo privzeli, da je mejna vrednost vertikalnega gradienta za talilne peči en standardni odklon, ki pa znaša za vse meritve 26,96 nT/m. Zato smo privzeli, da so značilne magnetne anomalije, ki jih lahko interpretiramo kot ostanke talilnih peči, višje od 30 nT/m (*sl. 15*). Na ta način smo posredno dokazali obstoj objektov s podobnimi magnetnimi lastnostmi znotraj območja, ki ga je že Borut Križ zamejil na podlagi razširjenosti površinskih najdb odpadnih produktov metalurgije. Glede na rezultate magnetometrije lahko ocenimo, da je celotna površina talilniškega kompleksa velika približno 100×50 m, kar je nekoliko več od velikosti, ocenjene na podlagi površinskih najdb (Križ 1990, 23). Dabas in sodelavci (1993, 64,65) so pri geofizikalnih raziskavah na arheološkem najdišču Milanówek-Falecin (Poljska) na primer ugotovili, da povišanju koncentracije žlindre na površini ustreza enak velikostni red povišanja amplitude magnetnih anomalij. Avtorji so mnenja, da je mogoče z nekaterimi omejitvami primerjati površinsko gostoto žlindre z ustreznimi magnetnimi anomalijami. Kot mogoče omejitve navajajo dejstvo, da jim ni uspelo najti zadovoljive fizikalne razlage, zakaj je razmerje med gostoto žlindre in amplitudo magnetnih anomalij stalno, oz. zakaj je razmerje med obema spremenljivkama linearno.

Pri magnetometriji (*sl. 14* in *15*) lahko razberemo tudi nekatere pravilne linijske razporeditve visokih gradientov magnetnega polja, ki us-

trezajo magnetnim učinkom talilnih peči. Sklepamo, da so bile v teh linijah oz. nizih talilne peči grajene zaporedno in morda predstavljajo zaključene "talilne faze". Iz števila in velikosti peči v takšnem nizu bi lahko podali oceno količine železa, ki so ga v vsaki fazi pridelali.

Razen pričakovanih tipičnih (modelnih) magnetnih anomalij ciljnih arheoloških objektov (talne žlindre z inducirano-termoremanentnim tipom magnetizacije), ki so praviloma zelo močne, moramo pri interpretaciji rezultatov magnetometrije upoštevati tudi t. i. "topografski efekt". To pomeni, da moremo upoštevati tudi magnetne anomalije, ki so posledica morfologije geološke podlage in površja ter razlike v magnetni susceptibilnosti med kamninsko geološko podlago in prstjo, ki jo prekriva. V arheologiji je zaradi zelo raznolikih in zapletenih pogojev dela najbolje uporabiti kar empirične modele. V ta namen smo izdelali na območju 1 (sl. 2) digitalni model reliefa (sl. 16). Zajeli smo del industrijske cone z močnimi magnetnimi anomalijami na južni strani in del območja z zelo razgibanim reliefom in šibkejšimi magnetnimi anomalijami na severni strani. Relativne višinske razlike smo odčitavali v razdalji 2 m med merilnimi točkami z natančnostjo 1 cm. Na ta način smo lahko primerjali topografske razlike in magnetne anomalije, ki so posledica morfologije terena. V našem primeru so lahko vzrok takšnim naravnim magnetnim anomalijam spremenljiva debelina pedološkega horizonta, oblikovanost geološke podlage in velika razlika v magnetni susceptibilnosti med jurskim močno zakraselim apnenecem, ki je skoraj povsem nemagneten ($k_{\max} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{SI}$, $k_m = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{SI}$), in močno magnetnim zemljiščem, ki te apnence prekriva (sl. 6). Srednja vrednost navidezne magnetne susceptibilnosti na območju arheološke sonde znaša $6,24 \cdot 10^{-3} \text{SI}$ ($k_s = 5,00 \cdot 10^{-3} \text{SI}$). To vrednost lahko upoštevamo kot reprezentativno za navidezno magnetno susceptibilnost zemljišča na območju železarskega talilnega kompleksa.

Na sl. 16 vidimo, da se talilne peči oz. njihovi ostanki v obliki blokov talne žlindre pojavljajo le do gozdne poti, ki pelje od vznožja hriba do nasebine. Na tej poti oz. kolovozu, so bile ugotovljeni šibki negativni gradienti, kar je najverjetneje posledica plitvoležeče apnenčaste geološke podlage (sl. 16: kolovoz). Na pozitivni topografski anomaliji (sl. 16: greben) nismo ugotovili magnetnih anomalij. Globok jarek se po pričakovanju kaže kot območje zelo nizkih gradientov lokalnega magnetnega polja (sl. 16: jarek). Na ta način smo se prepričali, da so magnetne anomalije povzročene z naravnim okoljem veliko šibkejše od tistih, ki smo jih izmerili nad ostanki talilnih peči.

ZAKLJUČKI

Z geofizikalnimi raziskavami smo ugotovili velikost železnodobnega talilniškega kompleksa (približno $100 \times 50 \text{ m}$). Glede na velikost celotne industrijske cone in število blokov talne žlindre smo posredno podprli tezo o talilnih pečeh, ki so jih uporabljali pri ekstenzivnih železarskih metalurških procesih. To so bile peči za enkratno uporabo.

Ugotovili smo, da je tudi na takšnih arheoloških najdiščih mogoče za natančno kvantitativno interpretacijo koristno uporabiti metodo tridimenzionalnega magnetnega modeliranja. Za modeliranje ostankov talilnih peči, ki so objekti s inducirano-termoremanentno magnetizacijo in imajo zaradi termične zgodovine značaj močnih magnetnih dipolov, smo uporabili računalniški program Magpoly (USGS). Ugotovili smo, da je nizek pokončni valj najustreznejši geometrijski model za jame, zapolnjene z bloki talne žlindre. Za določanje njihove globine lahko uporabimo grafični postopek, kot ga predlaga Telford s sodelavci (1990, 87).

Pomembna je tudi ugotovitev, da lahko s kartiranjem navidezne magnetne susceptibilnosti tudi z uporabo preprostejših instrumentov, kot je npr. Kappameter KT-5, zamejimo železarske talilne komplekse.

Za magnetometrične prospekcije na podobnih najdiščih na Dolenjskem je pomembno tudi to, da t. i. "topografski efekt" ne vpliva bistveno na rezultate magnetometrije pri prospekciji na železarskih talilnih kompleksih.

Zahvale

Za sodelovanje se najlepše zahvaljujemo dr. Janezu Dularju, ki je dal pobudo za to raziskavo, in hkrati zagotovil pri Inštitutu za arheologijo ZRC SAZU tudi sredstva za materialne stroške. Da je rezultat raziskave takšen kot je, gre zahvala Borutu Križu, ki nam je ves čas stal ob strani s številnimi informacijami o arheološkem najdišču. Terensko delo pri magnetometričnih raziskavah sem opravil s pomočjo študentov arheologije Saša Poglajena, Jureta Sokliča in Benjamina Štularja. Geodetski posnetek morfologije terena sta naredila Lucija Lavrenčič in Šimen Peče. Za učinkovito pomoč se vsem najlepše zahvaljujemo. Računalniški program Magpoly, ki smo ga uporabili za tri-dimenzionalno magnetno modeliranje je posredoval dr. Bruce Bevan (Geosight, ZDA). Za dragoceno podporo se mu najlepše zahvaljujemo.

- ABRAHAMSEN, N. in N. BREINER 1991, Magnetic investigation of a mediaeval tile kiln near Kalo, Denmark. - V: *Archaeometry* 90, 657-666, Basel.
- ABRAHAMSEN, N. in N. BREINER. 1993, Archaeomagnetic investigations in Denmark: a review. - *Archaeology and Natural Science* 1, 5-17.
- BEVAN, B. 1996a, Geophysical exploration for archaeology. Volume A: Archaeological question and answers. - *Geosight technical report* 4, 150.
- BEVAN, B. 1996b, Geophysical exploration for archaeology. Volume B: Introduction to geophysical exploration. - *Geosight technical report* 4, 66.
- BIELENIN, K. 1966, Badania nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim przeprowadzone w 1964 r. - *Materiały Archeologiczne* 7, 159-177.
- BIELENIN, K. 1967, Sprawozdanie z badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim w 1965 r. - *Materiały Archeologiczne* 8, 241-251.
- BIELENIN, K. 1974, *Starożytne górnictwo i hutnictwo żelaza w Górach Świętokrzyskich*. - Warszawa.
- BIELENIN, K. 1983, Erkundung archaologischer Objekte mit modern technischen und naturwissenschaftlichen Methoden. - *Bodendenkmalpflege*, 79-97.
- BIELENIN, K., M. MANGIN in K. ORZECZOWSKI 1995, La sidérurgie ancienne et l'exploitation minière dans les Montagnes Sainte-Croix (Petite Pologne). 1 Bilan des recherches 1955-1990. - *Dialogues d'Histoire Ancienne* 21/1, 203-224.
- BOZZO, E., F. MERLANTI in D. POSTPISCHL 1991, Magnetometric investigations of the Mt. Bibele Celtic necropolis, Italy. - V: *Archaeometry* 90, 697-707, Basel.
- BUSER, S. 1974, *Tolmač lista Ribnica*. Osnovna geološka karta 1:100.000. Zvezni geološki zavod. - Beograd.
- CLARK, A. 1990, *Seeing beneath the soil*. - London.
- DĄBROWSKI, K. in STOPIŃSKI, W. 1962, Zastosowanie metody magnetycznej do badań cmentarzysk ciałopalnych z okresu rzymskiego. - *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej*, 605-615.
- DABAS, M., T. HERBICH, A. HESSE, K. MISIEWICZ in A. TABBAGH 1993, Electromagnetic prospecting at two Polish sites (Słonowice and Milanówek) with the SH₃ Slingram device. - *Archaeologia Polona* 31, 51-70.
- DESIGNES, G. in A. TABBAGH 1996, Simultaneous interpretation of magnetic and electromagnetic prospecting of characterization of magnetic features. - *Archaeological Prospection* 1/3, 129-139.
- DOBRIN, M. B. in C. H. SAVIT 1988, *Introduction to geophysical prospecting*. - McGraw-Hill International editions (Geology series, New York).
- DUNIKOWSKI, C. in S. CABBOI 1995, La sidérurgie chez les Sénonis : Les ateliers celtiques et gallo-romains des Clérimois (Yonne). - *Document d'Archéologie Française* 51, 86-100.
- GALE, D. in B. S. OTTAWAY 1991, Geophysical survey and surface artefact assemblage of prehistoric copper mining/working areas in Austria. - V: *Archaeometry* 90, 55-64, Basel.
- GODSON, R. H. 1983, *MAGPOLY: A modification of a three-dimensional magnetic modelling program*. U.S. Geological Survey Open-File Report 83-345, 62.
- GROLICH, V. in V. SOUCHOPOVÁ 1977, Užití geofyzikálních měření při zjišťování lokalit železářských pecí. - *Rozpravy národního technického muzea v Praze* 69, 13-23.
- HAŠEK, V. in S. MAYER 1977, Pěrispěvek k uplatnění geofyziky při archeologickém výzkumu železářských pecí na Blanensku. - *Sborník Okrestního vlastivědného muzea v Blansku* 6/7, 57-65.
- HAŠEK, V., T. B. HORÁK, K. LUDIKOVSKÝ in V. SOUCHOPOVÁ 1977, Komplexní archeologický výzkum hutnického střediska v Sudicích. - *Geologický průzkum* 19, 296-300.
- HAŠEK, V., T. B. HORÁK in F. OBR 1978, Úplnění přírodovědeckých metod při archeologickém výzkumu hutnického střediska v Sudicích. - *Sborník Okrestního vlastivědného muzea v Blansku* 10, 46-60.
- HEATHCOTE, C. in A. ASPINALL, A. 1981, Some aspects of the use of fluxgate magnetometers (gradiometers) in geophysical prospecting in archaeology. - *Revue d'Archéométrie* 5, 61-70.
- JÖNS, H. 1992, Early iron smelting at Joldelund, Kreis Nordfriesland, Germany. - *Arch. rozhl.* 44, 313.
- KRIŽ, B. 1988, Cvinger pri Dolenjskih Toplicah. - *Arh. preg.* 29, 88,89.
- KRIŽ, B. 1993, Arheološko območje Cvinger. - *Var. spom.* 34, 81-90.
- KRIŽ, B. 1990, Cvinger ali Branževac pri Dolenjskih Toplicah. - V: *Arheološka najdišča Dolenjske*, 23-26, Novo mesto.
- LININGTON, R. E. 1964, Cvinger pri Meniški vasi. The use of the simplified anomalies in magnetic surveying. - *Archaeometry* 7, 3-13.
- LININGTON, R. E. 1972, A summary of simple theory applicable to magnetic prospecting in archaeology. - *Prospezioni Archeologiche* 7, 9-59.
- LUDIKOVSKÝ, K. 1978, Die Fragen der archäologischen Komplexfeldforschungen in Mähren. - *Archaeologia Baltica* 3, 79-103.
- MAMZER, H. 1984, Bloomery site of La Tène and Early Romano-Barbarian periods at Psary, Poland. - *Arch. rozhl.* 36, 682,683.
- MIKLIČ, F. 1954, Magnetna deklinacija v Ljubljani za leto 1954.5. - *Geologija* 2, 225-232.
- MUŠIČ, B., B. SLAPŠAK, S. PIRC, N. ZUPANČIČ, F. DIMC in L. TROJAR 1995, On-site prospecting in Slovenia: the case of Rodik. - *Archaeological Computing Newsletter* 43, 6-15.
- PAPAMARINOPOULOS P., G. N. TSOKAS in H. WILLIAMS 1985, Magnetic and electric measurements on the island of Lesbos and the detection of buried ancient relics. - *Geoexploration* 23, 483-490.
- PAPAMARINOPOULOS P., G. N. TSOKAS in H. WILLIAMS 1986, Electric resistance and resistivity measurements and magnetic mapping of the archaeological relics on the castle of Mytilene. - *Bolletino Geofisica Teorica ed Applicata* 28, 111,112.
- PLENIČAR, M. in U. PREMUR 1977, *Tolmač lista Novo mesto*. Osnovna geološka karta 1:100.000. Zvezni geološki zavod. - Beograd.
- POUFF, D. 1975, *Derivation of formulas and Fortran programs to computemagnetic anomalies of prisms*. U.S. Geological Survey Report, 112 p., available from National Technical Information Service No. PB-243-525, U.S. Department of Commerce. - Springfield.
- POUFF, D. 1976, Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections. - *Geophysics* 41, 4, 727-741.
- SLAPŠAK, B., B. MUŠIČ in V. PERKO 1995, The Roman site of Rodik: surface distributions and geophysical prospecting. Populus project - Siena colloquium. - V: *Extracting meaning from ploughsoil assemblages*, Siena (v tisku).
- SMEKALOVA, T., O. VOSS in N. ABRAHAMSEN 1993, Magnetic investigation of iron - smelting centres at Snorup, Denmark. - *Archaeologia Polona* 31, 83-103.
- TELFORD, W. M., L. P. GELDART in R. E. SHERIFF 1990, *Applied geophysics*. - Cambridge.
- TITE, M. S. in C. MULLINS 1970, Electromagnetic prospecting on archaeological sites using a soil conductivity meter. - *Archaeometry* 12, 1, 97-104.

TYLECOTE, R. F. 1987, *The early history of metallurgy in Europe*. Longman archaeology series. - New York.

WOLLSCHLÄGER, B. 1992, A bloomery site at the late Romano-Barbarian and early Migration Period at Göhlen, Kr. Ludwigslust, N. Germany. - *Arch. rozhl.* 44, 314.

Magnetic Investigation of the Iron Age Iron-Smelting Complex at Cvinger near Meniška vas

Summary

INTRODUCTION

Considering the fact that slag pits and slag blocks were also discovered during the excavations at Cvinger near Meniška vas (Križ 1993, 86), we chose to apply magnetometric methods while prospecting. These were also the most appropriate on all similar types of archaeological sites. Smekalova and colleagues (1993, 84) write that the remains of an iron-smelting centre of this type is represented by a thick accumulation of slag blocks that remained in their primary position following the smelting process. These types of iron-smelting complexes are revealed by a more or less compact group of strong magnetic objects that lie shallow under the surface. Consequently, magnetic prospecting is an extremely efficient method for detecting and mapping such metallurgic complexes.

Local differences in the magnetic susceptibility in the presence of the Earth's primary magnetic field are determined during magnetic prospecting. This outer field is uniform and thus the magnetic anomalies are the vector sum of individual smaller dipolar magnetic fields. The magnetic moments in an archaeological object (or parts of an object), which is in its primary position and has induced/thermoremanent magnetisation, are oriented in the same direction. Consequently, iron-smelting furnaces can be treated as magnetic dipoles that are oriented approximately in the same direction as was the Earth's magnetic field when the furnaces cooled down and the magnetic field "froze" within them. The three-dimensional magnetic modelling method can be applied to determine the form and depth of these types of objects.

Magnetic modelling is a recognised method for assessing the interpretation of magnetograms and the correlation between magnetic and archaeological data. Magnetic modelling consists of simulating magnetic measurements in the field on models. These calculated and synthetic magnetograms are compared with the measurements from the field and then the model is interactively corrected until a satisfactory level of correspondence is achieved. Three-dimensional modelling of objects is a simple procedure for magnetic methodology and has been applied in archaeological prospecting for over 20 years (see Linington 1964, 3-13; Linington 1972, 9-59; Godson 1983, 62). A computer program that calculates the magnetic anomalies on the basis of an exact equation of the Earth's magnetic field was used for the purpose of three-dimensional modelling of archaeological objects (see e.g. Plouff 1975).

PLANNING THE INVESTIGATIONS AND THE METHODS APPLIED

Planning the geophysical investigations of the Iron Age iron-smelting complex at Cvinger near Meniška vas initiated with collecting all the existing archaeological information concerning previous archaeological investigations. We also considered particular physical facts, as described in the introduction, particular natural circumstances, as well as the

results of geophysical analyses obtained from similar archaeological sites elsewhere in Europe:

The magnetometry strategy dictates the size of the investigated area as well as the size of the target objects. The quality of the results, or rather the clarity, is usually a compromise between the time needed in the field and the density of measurements taken. To attain good visibility in magnetometry, the size of the target objects, which is dictated by the distance between the points of measurement as well as the distance between the sensor of the magnetometer and the surface, is of utmost importance.

Differences in the magnetic susceptibility between natural and archaeological materials on an archaeological site represent the most significant natural conditions for magnetic prospecting. Measurements of the apparent magnetic susceptibility were applied for the interpretation of the magnetometry and partially also as a separate prospecting method. The susceptibility of the natural and the contaminated soil and the susceptibility of the samples of slag and basic geology (Fig. 6) were measured to provide support for the magnetometry. The prospecting measurements were carried out within an exact grid directly on the surface (Fig. 2: areas 2 and 3).

When interpreting the magnetometry upon a variable surface morphology, the influence of the "topographic effect" must always be taken into account. Due to the large contrast in the magnetic susceptibility between the ground and the basic geology, which in our case comprises a thin layer of intense magnetic loamy ground lying above a very weak magnetic Jurassic limestone, relatively strong magnetic anomalies can result which "conceal" the magnetic anomalies that are the result of archaeological objects. A Digital Elevation Model (DEM) was made for the northern part of the investigated area (Fig. 2: area 1) so that the actual effect could be estimated.

The results of the magnetometry were interpreted on the basis of the amplitude and frequency of local anomalies of the gradient of the vertical component in the magnetic field. An empirical approach was applied for the interpretation of the established characteristic magnetic anomalies. The intensity and form of the magnetic anomalies above the slag block from the iron-smelting furnace no. 4, whose location was ascertained already during previous archaeological excavations (Križ 1993, 86) (Fig. 3), were considered. We thus indirectly confirmed the existence of objects with similar magnetic characteristics within the area that Borut Križ already delimited on the basis of the distribution of surface finds of metallurgic waste products (Fig. 2: excavated area).

The samples of slag that were collected from the surface during field walking were examined to produce a more precise classification of the types of iron-smelting processes. Macroscopic descriptions discussing select samples are presented below. The purpose of this was to produce enough evidence supporting the assertion that it is in fact an iron-smelting centre with extensive metallurgic processes and iron-smelting furnaces built for single applications.

Magnetometry

The magnetometry was carried out using a fluxgate gradiometer - PG (*fluxgate gradiometer*, Geoscan FM36, Geoscan Research, Bradford) (see e.g. Clark 1990, 69-71). This instrument was used to measure the gradient of the vertical component of the local magnetic field (dZ/dz , nT/m) with respect to a zero reference point that was determined prior to initiating measurements. It is imperative that this reference point is located in a magnetically very "quiet" space away from any areas with archaeological remains (Fig. 2). At the same time it should be close enough, for practical reasons, considering that this point shall be used throughout for calibrating the instrument. The results from the investigations are largely dependent upon a sound choice for a reference point as all measurements of local gradients pertain to this zero point and refer to the relative difference versus this point (Fig. 2: reference point).

As the intensity and the form of magnetic anomalies during archaeological prospecting depends upon the difference between the magnetic susceptibility of the ground and the archaeological objects, as well as upon the orientation of the Earth's magnetic field, magnetic anomalies are always considered in light of this. Consequently, all signs expressing North refer to the magnetic North (Nm). The azimuth of the base line is 314° (Fig. 2). The magnetic declination in Ljubljana was $-1^\circ 37'$ in 1954 and changed only by a few minutes since 1850 (Miklič 1954, 225). For our purposes we can assume that the magnetic declination is equal to zero. The magnetic inclination measures approximately 62° (Telford et al. 1990, 69). Due to the magnetic inclination, the magnetic anomalies at this geographic latitude are always extremely bipolar, with strong positive gradients at the southern end of the archaeological object and weaker negative gradients at the northern end. Smekalova and colleagues (1993, 87) write that the relationship between thermoremanent and induced magnetisation (Q) is less than 1, which means that the slag blocks mainly comprise induced magnetisation. This shows that the positive and negative magnetic gradients are oriented precisely in the direction of the Earth's current magnetic field.

The investigated area was divided into quadrants measuring 20×20 m (Fig. 2). Measurements were taken perpendicular to the base line in a south-west direction. The azimuth of the magnetic profiles remained constantly equal at the degree of 224° . The distance between the magnetic profiles and the measuring points on the profiles was 0.5 m. A total of 1600 measurements were read for each 20×20 m quadrant. This amounts to 42,400 measurements all together. The density of measurements was determined on the basis of the size of the pits, measuring between 40 and 70 cm on the average, that were filled with slag blocks (Križ 1993, 86). Measurements were repeated in the area of the archaeological excavation to provide more reliable results from the magnetometry and the magnetic modelling (Fig. 3). The distance between the measuring points was 0.25 m in both directions this time. While planning the investigations, we took into account the advice of Smekalova and colleagues (1993, 83); on the basis of numerous experiments where they used various numbers of measurements per surface unit and various heights of the magnetometer sensor above the surface, they determined that even in the instance of strongly magnetic remains of Iron Age iron-smelting furnaces, optimal information for precise magnetic modelling can be obtained if the distance between the measuring points is 0.5 m or less in both directions and if the magnetometer sensor is very close to the surface. In the centre of the group, where the pits are very close together, the anomalies of adjacent dipoles get added together depending upon their normalised distances $-a/h$ (h -depth). A proton magnetometer enables two adja-

cent objects to be distinguished if the distance between the pits is more than 1.5 h. To generate characteristic anomalies of adjacent blocks of slag at optimal conditions of resolution ($a = 1.5 h$), the distance between measuring points must not exceed 0.5 m (Smekalova et al. 1993, 89).

Considering that the furnaces are situated close together, sometimes even covering each other, it is recommendable to use a gradient type of measurement for magnetometry so as to ensure enhanced resolution of the individual slag blocks. It is well known that individual components of complex signals can be distinguished on the basis of anomalies of the gradients of the vertical components. Consequently, they are used to determine the location, form and depth of the bodies that create the magnetic anomalies.

The additional advantage of gradient types of measurement is the automatic nullification of regional and periodic variations in the magnetic field (Smekalova et al. 1993, 99).

Magnetic Susceptibility

The apparent magnetic susceptibility (k) was measured at Cvinger using a Kappameter KT-5 (Geofyzika, Brno) field instrument. This instrument is otherwise intended for measuring the apparent magnetic susceptibility of stone samples for geological mapping, although it is also applied for archaeological purposes. Its applications are mainly limited to determining the apparent magnetic susceptibility of soil samples, basic geology and archaeological materials that are found upon the surface (e.g. building materials and slag). These data are required for more reliable interpretations in magnetometry (see e.g. Bozzo et al. 1991, 699).

The apparent magnetic susceptibility was measured on the samples of slag, on limonite concretion, on the slag block from the iron-smelting furnace no. 4, on the surface of the excavated area and in areas 2 and 3 (Fig. 2) where the apparent magnetic susceptibility values were mapped (Fig. 8 and 9). The distance between the profiles and the measuring points was 1 m. A total of 400 measurements were read for each 20×20 m quadrant, amounting to a total of 1200. Measurements were taken directly upon the surface, while 1 dm² of turf was removed for each measurement in area 1. The same size of expanse was cleared in area 2 to achieve a flat surface without any larger pieces of organic material. The differences in the apparent magnetic susceptibility are depicted on the comparative graph of mean values (Fig. 6).

The purpose of these measurements was to determine the level of correlation between the magnetic map and the map of apparent magnetic susceptibility. Considering the small depth range of the Kappameter KT-5 instrument, the good correlation between the two maps (Fig. 8 and 9) can be accounted for by the intense archeo-metallurgic contamination of the ground with iron minerals. The remaining explanations for the increased apparent magnetic susceptibility, such as the "heating effect", can be disregarded in this instance. Contamination with metallurgic waste products in the extraction of iron has an incomparably stronger influence upon the magnetic characteristics of the ground than just the conversion of weakly magnetised iron minerals into more magnetic forms at high temperatures (see e.g. Mušič et al. 1995, 6-15; Slapšak et al. 1995). The results from prospecting at Ajdovščina above Rodik demonstrated that higher apparent magnetic susceptibility values than the "border value", which represents the limit to which the increased apparent magnetic susceptibility of the ground can reach as a consequence of high temperatures (the "heating effect") in a reduced atmosphere, is exclusively the result of contamination from ceramic or metallurgic dust. The findings from the labora-

tory analyses indicated that the admixture of ceramic fragments and metallurgic waste products strongly influences upon the increased susceptibility.

The practical significance of this test for archaeological prospecting should be disclosed. If a high level of correlation between the two methods were evident, then only the apparent magnetic susceptibility method could be applied at similar sites where only the boundaries of the industrial zone appealed to us. The advantage of this method lies, above all, in its easy application in the field and in the fact that it is relatively simple for interpretation.

The results at Cvinger denoted that the apparent magnetic susceptibility values within the iron-smelting complex (Fig. 2: area 3 and Fig. 9) were, on the average, approximately five times higher ($k_m = 4,16 \cdot 10^{-3}$ SI) than at its border ($k_m = 0,82 \cdot 10^{-3}$ SI), where part of the iron-smelting complex, as well as part of the uncontaminated surface, was incorporated (Fig. 2: area 2 and Fig. 8). The size classifications of the measured apparent magnetic susceptibility values correspond with the results of Dabas and colleagues (1993, 66).

Furthermore, it was also determined that the border of iron-smelting centres can be discerned by magnetometry as opposed to mapping the apparent magnetic susceptibility values. However, this can only be maintained for level surfaces at the moment (!). The advantage of this method is that it is inexpensive, easy to carry out in the field and simple for interpretation (Fig. 8).

MACROSCOPIC DESCRIPTIONS OF PRODUCTS OF METALLURGIC ACTIVITY

Macroscopic descriptions, the weight and the apparent magnetic susceptibility of select fragments of slag that were collected during non-systematic field walking in November, 1997, shall be specified in the continuation. The field survey was lead by Lionel Orengo, a doctorate student at the University in Dijon, who is investigating iron metallurgy in Late Iron Age settlements in the South-Center of France (Auvergne). The field walking was carried out after the magnetometry results had already been attained and thus the extent of the iron-smelting complex was already known. The field survey was intended to procure characteristic samples of metallurgic waste products that could then provide the necessary proof to classify the type of ironworks metallurgic processes.

A total of approximately 7 kg of various slag was collected. All the samples indicate characteristic signs of metallurgic activity for the extraction of iron, that is, for the simple procedure of iron-smelting (reducing the iron ore). Three main types of iron slag were classified out of the total collected mass of samples. The samples were then weighed and provided with macroscopic descriptions. The apparent magnetic susceptibility values (Kappameter KT-5) were added to the macroscopic descriptions for individual samples or groups of samples. Our intention was to determine whether apparent magnetic susceptibility can be used as an additional differentiating criteria for individual types of slag. At the same time, we also wanted to establish the entire range of apparent magnetic susceptibility values for all the characteristic types of slag that were found at the site (Fig. 6). This was also used to estimate the most appropriate apparent magnetic susceptibility of slag blocks for magnetic modelling. Further metalographic, petrographic, mineralogic and chemical analyses shall be necessary in order to establish a more precise interpretation of the iron-smelting processes.

Fragments of slag, or rather pieces of slag-pit blocks (*fond de four en fosse*), attest to the extensive iron-smelting processes of furnaces built for single applications. Iron-smelting furnaces which were in use in central Europe at the end of the Iron Age and during the Roman era (Bielenin et al. 203-224) produced waste products, in the form of large circular slag blocks, while smelting. These remained in the pits at the bottom of the iron-smelting furnaces (Tylecote 1987, 311) after the bloom had been removed (Fig. 5). A specifically high weight is characteristic for these pieces of slag. In general, they represent fragments of blocks of various smelting products that usually take shape near the centre of the highest temperatures in the iron-smelting furnace, in direct proximity to the holes conveying air. These blocks can have a very heterogeneous composition. They are mainly composed of pieces of slag, bloom, pieces of charcoal and fragments of partially reduced ore. Following the entire iron-smelting process only the bloom, which represented the raw material for further cleansing processes, was removed from this type of block. All the remaining material in the iron-smelting furnace was useless for this former procedure of extracting iron, and thus it usually remained in its primary position - in the pit at the bottom of the iron-smelting furnace.

Sample no. 1 (Fig. 17-19): A fragment of a slag-pit block (*fond de four en fosse*) that measures 10 cm along the longer axis, weighs 2055 g and is intensely magnetised ($k_m = 39,10 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_s = 5,36 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_{min} = 29,10 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_{max} = 51,40 \cdot 10^{-3}$ SI).¹ This fragment is significant as already its shape speaks of its primary position in the pit at the bottom of the iron-smelting furnace (Tylecote 1987, fig. 8.4). Descriptions of three surfaces of the same sample are presented. *Surface 1* is carefully rounded and illustrates the shape of the bottom of the iron-smelting furnace pit. It is most likely a piece of a block, that makes contact with the bottom of the furnace (Fig. 17). *Surface 2* is an irregular shape that formed as fragments of smelted slag (*faciès coulée*) accumulated as they fell upon the surface of the already hardened block of slag. The fragments of slag probably turned liquefied between the pieces of charcoal in the upper parts of the iron-smelting furnace where the temperature was higher. This phenomenon probably occurred on the underside of the slag-pit block that was forming directly upon the layer of charcoal (Dunikowski et al. 86-100) (Fig. 18). *Surface 3* is also an irregular shape as the result of impressions of fragments of charcoal. It is most likely the upper surface of this slag-pit block (*fond de four en fosse*) (Fig. 19).

Sample no. 2: A fragment of a slag-pit block (*fond de four en fosse*) that measures 15 cm along the longer axis, weighs 3270 g and is intensely magnetised ($k_m = 51,28 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_s = 20,42 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_{min} = 27,89 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_{max} = 87,69 \cdot 10^{-3}$ SI).

Sample no. 3: A fragment of a slag-pit block (*fond de four en fosse*) that measures 4.5 cm along the longer axis, weighs 512 g and is of medium magnetisation ($k_m = 17,05 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_s = 2,69 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_{min} = 12,50 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_{max} = 21,51 \cdot 10^{-3}$ SI).

Sample no. 4 (Fig. 21) (a group of glassy slag samples): The common characteristic of these fragments of slag is that they are poriferous and very light considering that they are composed mainly of silicate minerals. The total mass is 842 g. They are weakly magnetic ($k_m = 6,08 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_s = 5,67 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_{min} = 0,25 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_{max} = 19,20 \cdot 10^{-3}$ SI). Burned clay clings to the samples in places; this is probably the consequence of smelting the inner parts of the clay walls of the furnace.

Sample no. 5 (Fig. 22) (a group of smelted fragments of slag with a rounded off surface - *faciès coulée*): These pieces of slag are dense and they form during all levels metallurgic processes for the extraction of iron, as well as during the

¹ k_m = the middle apparent magnetic susceptibility value, k_s = the standard deviation of the apparent magnetic susceptibility, k_{min} = the lowest apparent magnetic susceptibility value, k_{max} = the highest apparent magnetic susceptibility value.

forging of iron. Consequently, a more precise interpretation is impossible without further metallogenic analyses. The total weight of the 10 fragments of slag is 200 g. One of the possible means of formation is similar to the description for Sample 1 and surface 2, aside from the evident fact that these fragments were not parts of the slag-pit block. All the samples of this type are very weakly magnetic ($k_m = 1.92 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_s = 0.73 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_{min} = 0.97 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_{max} = 3.45 \cdot 10^{-3}$ SI).

MAGNETIC MODELLING (A PHYSICAL-ARCHAEOLOGICAL MODEL)

The goal of modelling magnetic anomalies is to adjust the input parameters so that the final difference between the calculated and the measured anomalies is as slight as possible. The parameters used to calculate the three dimensional model provide the basis, indirectly, for interpreting the measured anomalies.

Theoretically, the magnetic anomaly on the Earth's surface can be the result of a combination of infinite numbers of various magnetic fields. A relatively homogeneous magnetic body and a smaller, isolated magnetic object made of the same material, both equally dispersed in a larger space, can create the same magnetic anomaly as the result of differences in the induced magnetisation. The information concerning target objects (e.g. slag blocks from iron-smelting furnaces) and the medium in which they are present (e.g. loam, limestone) provide significant guidance for the interpretation of magnetometry. Three-dimensional magnetic modelling is generally applied to secure an evaluation of the form, size and depth of archaeological target objects, which are usually small and are situated shallow under the surface (see e.g. Godson 1983). The basic principle is to find the most appropriate expression to calculate the physical field, such as the vertical component of the intensity of the magnetic field of some simple geometric body (a sphere, a vertical cylinder, a many-sided prism and a flat surface) (Telford et al. 1990, 84-105), which is as similar as possible, in form and in three-dimensional space, to the anticipated form of the archaeological object being searched for. Precise estimations of certain physical parameters, such as the type of magnetisation (induced and/or thermoremanent magnetisation) and the contrast in the magnetic susceptibility between an archaeological object and the media in which it is, are required to secure successful magnetic modelling. Of course, we also need to know an appropriate estimation of the declination, inclination and the intensity of the Earth's magnetic field at the location of the archaeological remains. Data providing a satisfactory description of the basic magnetic characteristics of the target objects that are being investigated and the media in which they are situated is almost always at our disposal. The questions being examined by magnetic modelling vary and depend upon the type of archaeological site and the natural characteristics of the individual target objects. The practical significance of magnetic modelling is the establishment of the geometric parameters, such as the position, form, size and depth, of the archaeological object. One of the most frequent questions imposed that can be provided with a sufficient answer is the depth at which the archaeological object is located.

The Procedure for Magnetic Modelling

The most appropriate geometric model is selected based upon the anticipated form of the objects. Following the example of Smekalova and colleagues (1993, 87) on a similar archaeological site, considering that spherical objects of slag

blocks are anticipated in our case, a model of a sphere with a uniform distribution of magnetisation (dipolar points) and positioned at a depth that is an equal distance from the surface to the centre of the object can be applied.

The results from archaeological excavations (Križ 1993, 86) ascertained a wide variety of forms and sizes of slag blocks. Some have circular, some quadratic and yet some have ellipsoidal horizontal cross-sections. That the anticipated height of the body (Z) of the slag block is generally the shortest dimension is a significant determination for magnetic modelling. In some instances it measures even less than 1/4 of the mean values of length (X) and depth (Y) (Fig. 7).

Consequently, it seems that a short vertical cylinder would be the most appropriate geometric form for the magnetic modelling of the pits filled with slag blocks. The form of a vertical cylinder was already suggested by Abrahamsen (1965, 115-132) as an appropriate alternative to the simple model, proposed by Smekalova and colleagues (1993, 87), of a pit with slag blocks in the shape of a steeply dipping, inclined magnetic dipole, and represents the equivalent of a homogeneous, magnetised spherical body.

The mean value ($k_m = 9.56 \cdot 10^{-3}$ SI), which was calculated on the basis of surface measurements of the only excavated iron-smelting furnace available in its entirety (Fig. 3: furnace no. 4 and Fig. 7), was entered as the characteristic magnetic susceptibility of the slag blocks at the very beginning. The k_m value proved to be much too low to provide an appropriate estimate of the average k for all slag blocks. In order to examine the precision of the input parameters for three-dimensional magnetic modelling, the vertical component of the magnetic field (Z) above furnace no. 4 was used, as well as the procedure for isolated dipoles suggested by Telford and colleagues (1990, 87,88). On the basis of 31 surface measurements indicating a disproportionate distribution between the mass of the slag blocks ($k_{min} = 1.34 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_{max} = 21.89 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_m = 9.56 \cdot 10^{-3}$ SI, $k_s = 4.65 \cdot 10^{-3}$ SI), the magnetic susceptibility had to be corrected. Most likely being very nonhomogeneous bodies, the compact core of the slag block is the most magnetic. This value was then corrected by a comparison between the modelled and calculated magnetic anomaly (Fig. 10) and the calculated magnetic anomaly above the furnace (Fig. 11). The appropriate apparent magnetic susceptibility value for slag blocks proved to be approximately $25 \cdot 10^{-3}$ SI.

The height of the furnace no. 4, measuring 20 cm, was regarded for the height of the modelled cylinders. The depth of the furnace under today's surface was approximately 30 cm (Fig. 7). These were the only two variables that remained constant throughout the modelling process. The height of the sensors was adjusted between 10 and 20 cm (Z_1) and between 60 and 70 cm (Z_2). An entirely precise determination of the shape of the furnace is impossible considering that the magnetic anomalies depend upon the magnetic susceptibility of the magnetic cores of the slag blocks. This is also clearly visible in Fig. 7. It can be inferred that only the size of the magnetic cores of the slag blocks can be determined exactly. The circumference of the short vertical cylinders that represent the geometric models of these cores was determined on the basis of the measured gradients (dZ/dz) (Fig. 3). Establishing the magnetic effect of the slag blocks, a cylinder with a contour line of 50 nT/m (Fig. 3) was selected from this map of magnetic anomalies (Fig. 2: excavated area) as an approximate example. The results from the magnetic modelling illustrate (Fig. 10, 11, and 12) that the input parameters were set sufficiently and that a precise interpretation of the measured magnetic anomalies can be sustained already on the basis of the level of correlation between the results of the magnetic modelling and the calculated values.

The magnetic field of the models prepared in this manner was calculated using the Magpoly computer program

(Godson 1983). This program calculates the magnetic effect of three-dimensional bodies composed of truncated prisms that lay atop each other. They form polygonal shapes in the ground plan (Plouff 1975). The exact equation $T = (H + X)^2 + (mH + Y)^2 + (nH + Z)^2 - H$ (H = the intensity of the Earth's magnetic field) was applied to calculate the total magnetic field; X, Y and Z are components of the magnetic anomaly along the three perpendicular axes; l, m and n are the cosines of the directional angle of the vector of the Earth's total magnetic field. The result of magnetic modelling for the excavation area (Fig. 3) is illustrated in Fig. 13.

INTERPRETATION OF MAGNETOMETRY

An empirical approach was applied for the interpretation of magnetic anomalies throughout the entire investigated area. The intensity and the form of magnetic anomalies above the slag blocks of the iron-smelting furnace no. 4, whose location was ascertained already during previous archaeological excavations (Fig. 3 and 7) (Križ 1993, 86), were considered. This magnetic anomaly was then compared with the other measured anomalies (Fig. 14). The measurements of the gradients of the vertical components of the magnetic field (dZ) totalled 42,400, the mean value of all the measurements (dZ_m) was 0.45 nT/m, and the standard deviation (dZ_s) was 26.96 nT/m. The high standard deviation illustrates the wide range of calculated values. Considering that the arrangement of values is similar to the normal Gauss one (see e.g. Fig. 2: excavation area), it can be assumed that approximately 99 % of all the measured values occur within the range of -80.43 nT/m and +81.33 nT/m. Only extremely intense anomalies above the slag blocks and in the vicinity of iron objects are located outside this area.

It was determined that the values of the magnetic anomalies of the slag blocks within the excavation area (Fig. 2), where the distance between the measuring points was 0.25 m and the magnetometer sensor was 10 cm above the ground surface, were those that measured more than one standard deviation = 50 nT/m (Fig. 3 and 4). The distance between the measuring points throughout the remaining investigated surface was 0.5 m, while the magnetometer sensor was approximately 20 cm above the ground surface. Due to the decreased density of measurements and the somewhat increased distance between the magnetometer and the ground surface, the magnetic anomalies were generally weaker. For an interpretation of the entire investigated area it was assumed that the border value of the gradient of the vertical component of the iron-smelting furnace is one standard deviation that measures 26.96 nT/m for all measurements. Consequently, it was also assumed that the characteristic magnetic anomalies that can be interpreted as the remains of iron-smelting furnaces are higher than 30 nT/m (Fig. 15). The presence of objects with similar magnetic characteristics within the area that Borut Križ had already delimited on the basis of the distribution of surface finds of metallurgic waste products was thus indirectly confirmed. The magnetometry results ascertain that the entire area of the iron-smelting complex extended approximately 100 x 50 m, which is somewhat larger than the size estimated on the basis of surface finds (Križ 1990, 23). Dabas and colleagues (1993, 64,65) determined during geophysical investigations at the archaeological site of Milanówek-Falecin (Poland) that an increase in the concentration of slag on the surface corresponds with the same size classification of increase in the amplitude of magnetic anomalies. The authors believe that, with a few restrictions, the surface density of slag can be compared to the corresponding magnetic anomalies. They cite the fact that they failed to find an alternative satisfactory physical explanation

as a possible restriction, since the relationship between the density of slag and the amplitude of magnetic anomalies was constant, or rather, since the relationship between the two variables was linear.

Certain regular linear arrangements of the gradients of the vertical components of the magnetic field, which correspond to the magnetic effect of iron-smelting furnaces, can be discerned from the magnetometry (Fig. 14 and 15). It can be inferred that these lines, or rather series of iron-smelting furnaces were built consecutively and that they possibly represent complete "smelting phases". As estimate of the amount of iron produced in each individual phase could be deduced by the number and the size of the furnaces in such a series.

Aside from the anticipated typical (modelled) magnetic anomalies of archaeological target objects (of slag blocks with an induced/thermoremanent type of magnetisation), which are very intense as a rule, the "topographic effect" must also be considered in the interpretation of the magnetometry results. The magnetic anomalies that are the consequence of the morphology of the basic geology and the surface must also be considered, as well as the differences in the magnetic susceptibility between the aggregate basic geology and the soft soil that covers it. An empirical model is the most appropriate in archaeology due to the great variety of, and complications in, the work conditions. A Digital Elevation Model (Fig. 16) was created for this purpose in area 1 (Fig. 2). Part of the industrial zone with intense magnetic anomalies at its southern end as well as part of the area with a very dynamic relief and weaker magnetic anomalies at the northern end were incorporated. The relative differences in height were read at intervals of 2 m between the measuring points to a precision of 1 cm. The topographic differences and the magnetic anomalies that are the result of the morphology of the terrain could thus be compared. In our case, the cause of these types of natural magnetic anomalies could be the varying thickness of the pedologic horizon, the shape of the basic geology and the great difference in the magnetic susceptibility between a very weakly magnetic Jurassic karst limestone ($k_{max}=0.2 \times 10^{-3}$ SI, $k_m=0.1 \times 10^{-3}$ SI) and the intensely magnetic soil lying above (Fig. 6). The mean apparent magnetic susceptibility value in the area of the archaeological excavation measures 6.24×10^{-3} SI ($k_s=5.00 \cdot 10^{-3}$ SI). This value can be regarded as representative of the apparent magnetic susceptibility of the soil in the area of the iron-smelting centre.

Figure 16 illustrates that the iron-smelting furnaces, or rather their remains in the form of slag blocks, are present only up to the trail in the forest which leads to the settlement from the foothills of the mountain. Weak negative gradients were detected along this trail which are most likely the result of a low-lying limestone basic geology (Fig. 16: trail). No magnetic anomalies were detected on the positive topographic anomaly (Fig. 16: crest). The deep trench, as anticipated, appears as an area of very low gradients of the local magnetic field (Fig. 16: trench). It was thus confirmed that the magnetic anomalies caused by the natural environment were much weaker than those measured above the remains of the iron-smelting furnaces.

CONCLUSIONS

The size of the Iron Age iron-smelting centre (approx. 100 x 50 m) was established using geophysical investigations. The size of the entire industrial zone and the number of slag blocks indirectly support the hypothesis that the iron-smelting furnaces were used for carrying out extensive metallurgic processes, where the furnaces were built for a single application.

It was also established that the application of three-dimensional magnetic modelling proves useful for precise quantitative interpretation of these types of archaeological sites. The remains of the iron-smelting furnaces, objects with induced/thermoremanent magnetisation and which have the characteristic of intense magnetic dipoles due to their thermal record, were modelled using the Magpoly (USGS) computer program.

The short vertical cylinder proved to be the most appropriate geometric model for pits filled with slag blocks. The graphic procedure suggested by Telford and colleagues (1990, 87) can be applied to determine their depths.

Mag. Branko Mušič
Univerza v Ljubljani
Filozofska fakulteta
Oddelek za arheologijo
Zavetiška 5
SI-1001 Ljubljana

Lionel Orengo
Unité mixte de recherche
5594-Archéologie de la Bourgogne:
Université de Bourgogne
6 Boulevard Gabriel
F-21000 Dijon

The establishment that the extent of the iron-smelting complex can be marked off by mapping the apparent magnetic susceptibility, using even a more simple instrument such as the Kappameter KT-5, is of some significance.

Concerning magnetometric prospecting on similar sites in the Dolenjska region, it is also of some significance that the "topographic effect" does not affect the magnetometry results obtained while prospecting on an iron-smelting complex.